

VŠB –Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Strategie frézování tvrdého keramického
materiálu pomocí technologie
vysokorychlostního abrazivního vodního
paprsku**

The Strategy of Milling of Hard Ceramic Material
Using High-Speed Abrasive Water Jet Technology

Student:

Vladimír Ptáček

Vedoucí práce:

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Vladimír Ptáček**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Strategie frézování tvrdého keramického materiálu pomocí technologie vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku
The Strategy of Milling of Hard Ceramic Material Using High-Speed Abrasive Water Jet Technology
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Technologie frézování a možnosti frézování tvrdých materiálů.
3. Experimenty frézování dle navržených způsobů.
4. Zhodnocení tvarových vlastností výsledného povrchu ve vztahu ke způsobu frézování a parametrům paprsku pomocí optické bezdotykové metody.
5. Analýza zjištěných poznatků, návrh optimální strategie frézování, závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:


ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.
LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis 1995. ISBN 1-880342-01-4.
Série sborníků International Conference on Water Jetting, BHR Group.
Série sborníků konferencí Water Jet Technology Association, WJTA.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

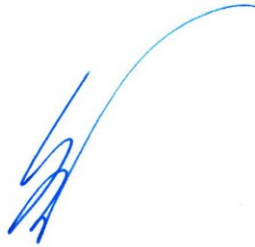
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Sitek, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

20.5. 2018



Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské*) práce bude uložena u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne:

20.5. 2018



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Vladimír Ptáček

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Slavičín 76 321

Nad Výpustou 514

Poděkování:

Děkuji Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při zpracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat zaměstnancům Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. za pomoc při experimentech a poskytnutí literárních podkladů.

Anotace bakalářské práce

PTÁČEK, V. *Strategie frézování tvrdého keramického materiálu pomocí technologie vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 59 s. Vedoucí práce: Sitek, L.

V bakalářské práci řeším strategii vysokorychlostního vodního paprsku pro frézování tvrdého keramického materiálu. Práce je rozdělena na dvě hlavní části. Na teoretickou část a na část experimentální. V teoretické části se zabývám hlavními částmi systému vodního paprsku, dále popisem principu systému vodního paprsku a možností využití jiných technologických operací s daným systémem vodního paprsku. V úvodní části experimentu zjišťuji správné technologické parametry pro frézování keramiky pomocí experimentálních drážek. Po stanovení správných technologických parametrů v další části experimentu určuji dvě strategie frézování. Po vyfrézování jsem obě strategie zhodnotil a stanovil nejlepší strategii s nejvýhodnějšími technologickými parametry.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PTÁČEK, V *The Strategy of Milling of Hard Ceramic Material Using High-Speed Abrasive Water Jet Technology: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2015, 59 p. Thesis head: Sitek, L

In bachelor thesis I deal with the strategy of high speed water jet for milling of hard ceramic material. The thesis is divided into two main parts. The theoretical part and experimental part. In the theoretical part I deal with the main parts of the water jet system, the description of the principle of the water jet system and the possibilities of using given water jet system for other technological operations. In the introductory part of the experiment, I find the right technological parameters for ceramic milling using experimental grooves. After determining the right technological parameters in the next part of the experiment, I determine two milling strategies. After milling, both strategies have been evaluated and set the best strategy with the most favourable technological parameters.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Al₂O₃		oxid hlinitý ASJ
ASJ		Abrasive Suspension (Slurry) Jet
AWJ		Abrasive Water Jet
CAD		Computer-Aided Design
CAM		Computer-Aided Manufacturing
CNC		Computer Numerical Control
ČSAV		Československá akademie věd
DWJ		Dynamic Water Jet
MESH		počet ok fiktivního síta na čtvereční palec
WJM		Water Jet Machining
PAA		Polyakrylamid
PEO		Polyetyloxid
D	[mm]	průměr trysky
m_a	[kg/min]	průtok abraziva
p	[Pa]	tlak
v_c	[mm/min]	řezná rychlost

Obsah

1. Úvod	10
2. Technologie vysokorychlostního vodního paprsku	11
3. Historie vodního paprsku	13
4. Technologie WJ (čistý vodní paprsek)	15
5. Technologie AWJ (Abrazivní vodní paprsek)	17
6. Technologie ASJM	20
6.1. Generační mechanismy abrazivních suspenzních trysek	21
6.1.1. Vliv hlavních parametrů	22
7. Technologie pulzních paprsků	23
8. Hlavní části systému vodního paprsku	25
8.1. Elektromotor	25
8.2. Olejové čerpadlo	25
8.3. Čerpadla	25
8.3.1. Rotační čerpadlo s přímým pohonem	25
8.3.2. Multiplikátor	26
8.4. Řezací hlava	27
8.4.1. Řezací hlava pro WJ	27
8.4.2. Řezací hlava pro AWJ	28
8.5. Tryska	28
8.6. Zaostřovací trubice	29
8.6.1. Venturiho efekt	29
9. Příměsi	30
9.1. Abraziva	30
9.2. Stabilizátor proudění	32
10. Experiment	33

10.1.	Experimentální materiál.....	33
10.2.	Použité zařízení	33
10.3.	Experimentální drážky.....	34
10.3.1.	Drážky 1-5.....	36
10.3.2.	Drážky 6-10.....	37
10.3.3.	Drážky 11-15.....	38
10.3.4.	Drážky 16-20.....	39
10.3.1.	Drážky 21-25.....	40
10.3.1.	Drážky 26-30.....	41
10.4.	Vyhodnocení experimentálních drážek	42
10.5.	Strategie frézování	44
10.6.	Strategie frézování s konstantním krokem	45
10.7.	Lineárně frézovaná kapsa 2x obrobená při tlaku $p=110$ MPa	45
10.8.	Lineárně frézovaná kapsa 2x obrobená při tlaku $p=170$ MPa	46
10.9.	Spirálová strategie frézování.....	47
10.10.	Spirálně frézovaná kapsa 2x obrobená při tlaku $p=110$ MPa	47
10.11.	Spirálně frézovaná kapsa 2x obrobená při tlaku $p=170$ MPa	48
11.	Závěr	49
12.	Použitá literatura	51
13.	Seznam obrázků.....	54
13.1.	Seznam tabulek	54
13.2.	Seznam grafů.....	55

1. Úvod

Výzkum procesů řezání a frézování materiálů vodním paprskem je nerozlučitelně spjat s celým obdobím rozvoje této nekonvenční metody. Dosáhl postupně velkého rozmachu v mnoha vyspělých zemích a stal se základem rozvoje poznání a následného uplatnění v technologii obrábění vysokorychlostním vodním paprskem v mnoha oblastech průmyslu.

Jednou z největších výhod je vlastnost studeného obrábění vodním paprskem. Tato vlastnost je jedinečná a nemá konkurenci v žádné jiné konvenční nebo nekonvenční technologii. Vlastnost studeného obrábění vodním paprskem umožňuje řezání materiálů, aniž by byly spáleny, taveny či popraskaly. Další velkou výhodou je bezprašnost technologie a využití při obrábění všech druhů materiálů.

Největší nevýhodou je bezpochyby pořizovací cena a hluchost sestavy vodního paprsku. Hluchost je tak velká, že musí být předepsány bezpečnostní pomůcky a prvky pro dané operace obrábění. Další velkou nevýhodou je obrábění savých materiálů, u kterých je potřeba dlouhé vysoušení. K nevýhodám patří také poměrně malá energetická účinnost celého systému - maximálně 60%.

Frézování pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku (AWJ) i vodního paprsku (WJ) je v současnosti intenzivně zkoumaná metoda nekonvenčního obrábění, která má velký potenciál využití v mnoha oblastech průmyslu vedle dalších aplikací paprsku jako jsou řezání, soustružení, čištění atd. Tato technologie je velmi rozvíjena a automatizovaná. Způsob obrábění je velmi efektivní, progresivní, v lze ji považovat za technologii budoucnosti s téměř neomezenými možnostmi při obrábění běžným způsobem neobrobitelných materiálů.

2. Technologie vysokorychlostního vodního paprsku

Jak již bylo uvedeno výše, obrábění vodním paprskem (WJ i AWJ) patří do široké skupiny metod nekonvenčního obrábění. Rozvoj těchto metod podnítil rozmach důlního, automobilového, leteckého, kosmického, chemického a stavebního průmyslu. Nekonenční metody, na rozdíl od běžných metod třískového obrábění, jsou charakteristické odebráním materiálu zejména tepelným, elektrickým, chemickým nebo kombinovaným způsobem. Technologie vodního paprsku disponuje výhodami, jaké neposkytuje žádná jiná technologie, čímž si vydobyla přední místo mezi tzv. nekonvenčními technologiemi.

Obrábění vodním paprskem má mnoho nesporných výhod, mezi které patří:

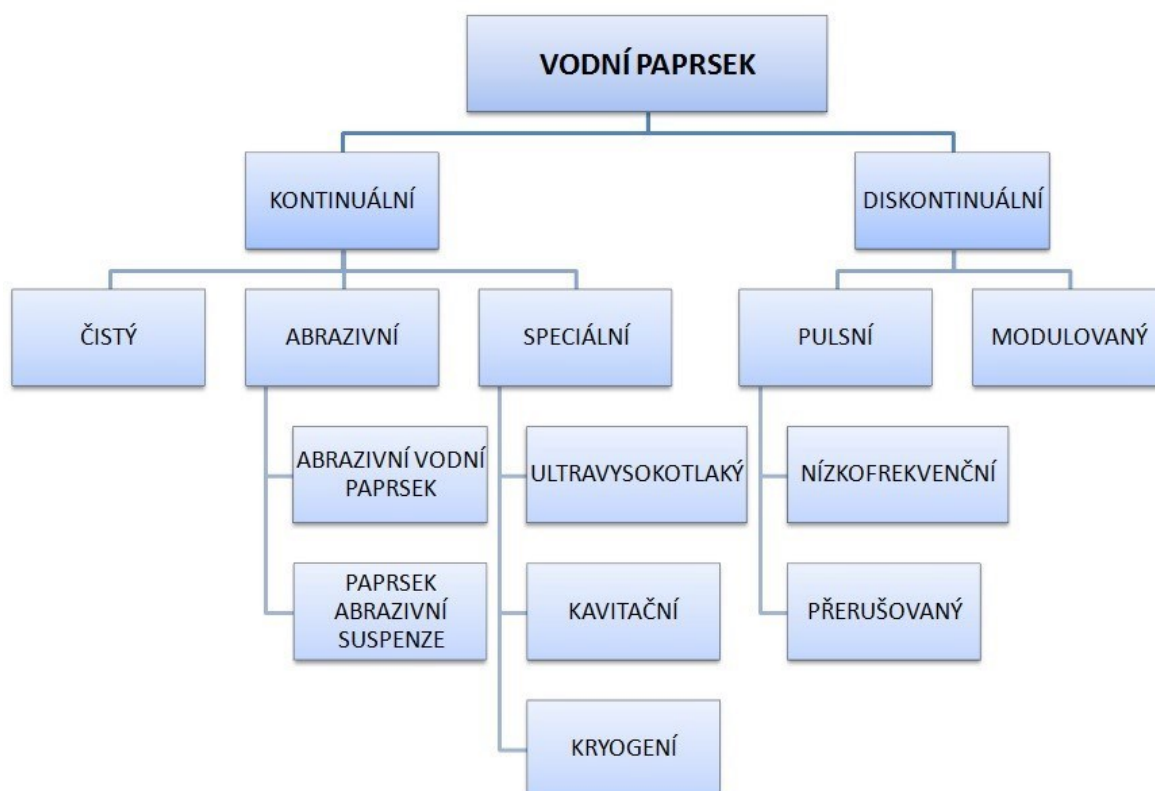
- možnost obrábění "téměř" všech materiálů,
- při obrábění nenastává odpařování obráběného materiálu,
- studený řez (tj. nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu),
- v obráběném materiálu nevznikají dynamické rázy ani vibrace, praskliny či trhliny, protože dynamické účinky jsou minimální,
- v důsledku minimálních řezných sil není nutné upínání materiálu, není potřeba přípravků na upínání,
- bezprašnost technologie, protože použitým nástrojem je voda, resp. kapalina, takže lze řezat i karcinogenní a jiné škodlivé materiály,
- možnost obrábění pod vodou a v explozivním prostředí,
- ekologické hledisko,
- možnost použití plně automatizovaného procesu obrábění a využití softwaru pro programování dráhy nástroje,
- možnost použití jiného média vytváří předpoklady využití i v jiných odvětvích, jako při řezání jatečného dobytka, mražených ryb, čokolády, atd.,
- bezpečnost technologie,
- malá šířka řezu pro čistý i pro abrazivní vodní paprsek. [6, 9]

Mezi největší nevýhody patří:

- velká hlučnost sestavy,
- nevyhnutelný kontakt obrobku s vodou či jiným pracovním médiem,
- vysoké nároky na čisté pracovní médium,
- energetická účinnost do 60%,
- u materiálů náchylných k nasáknutí velmi dlouhé vysoušení. [9]

Při experimentálním testování a různých měřeních se pro potřebu obrábění vodním paprskem zkoušela i jiná pracovní média než voda, avšak především vlivem snadné dostupnosti a nízké hodnotě viskozity se v praxi používají téměř výhradně vysokorychlostní vodní paprsky.

Na obr. 2.1 je znázorněno schématické rozdělení vodních paprsků podle spojitosti výstupního paprsku. [14]



Obr. 2.1-Schématické rozdělení vodních paprsků [14]

3. Historie vodního paprsku

První zmínky o využití vody k průmyslovému porušování materiálů pochází z 19. stol. V tomto století byla voda využívána pro těžbu minerálů a drahých kovů. Voda byla využívána k rozrušování horniny a oddělení těženého materiálu; zároveň často sloužila i k dopravě tohoto materiálu na požadované místo. Používaný tlak vody nebyl příliš vysoký, obvykle nepřekročil desítky MPa. [2]

Využití vody v hornickém průmyslu rozvíjel tehdejší Sovětský svaz a Nový Zéland při těžbě uhlí. Hornina byla odstřelena a následně přišla na řadu voda o vysokém tlaku, sloužící pro dopravu vytěžené horniny na povrch. [2]

Jeden z prvních, kdo prokazatelně úspěšně využil vysokého tlaku vody pro řezání, byl Dr. Norman Franz. V padesátých letech minulého století experimentoval s řezáním dřeva pomocí vysokorychlostního vodního paprsku. Dr. Franz je považován za zakladatele technologie obrábění vodním paprskem. Dokázal, že velmi tenký paprsek vody, dosahující velkých rychlostí při výtoku z trysky, má dostatečný řezný výkon, který by mohl být využit i při řezání dalších materiálů. [3]

Koncem sedmdesátých let minulého století se Dr. Mohamed Hashish zabýval možnostmi, jak zvýšit řezný výkon vysokorychlostního vodního paprsku tak, aby byl schopen řezat kovy a jiné tvrdé materiály. Zjistil, že přítomnost abrazivního materiálu v paprsku výrazně zvýší jeho účinnost. V roce 1979 vyvinul abrazivní vodní paprsek. Dr. Hashish je tedy považován za zakladatele abrazivního vodního paprsku. Tato technologie byla v brzké době použita na řezání oceli, skla i betonu. [3]

Další milník vývoje vodního paprsku nastal se založením firmy Flow v letech 1970. Společnost vyvinula čerpadla pro získání vysokého tlaku vody s nepřetržitým provozem. Ze začátku byla technologie využívána k řezání měkkých materiálů. Pro řezání tvrdých materiálů bylo zapotřebí určité přísady neboli abraziva. S tímto řešením přichází Dr. Mohamed Hashish, pokládáný za tvůrce abrazivního vodního paprsku. Při experimentech dospěl k závěru, že přidáním abraziva do vysokorychlostního paprsku vody lze dělit všechny známé materiály. Ve spolupráci s firmou Flow uvádí v roce 1980 na trh systém určený k řezání oceli, skla, betonu apod. Od tohoto období dochází

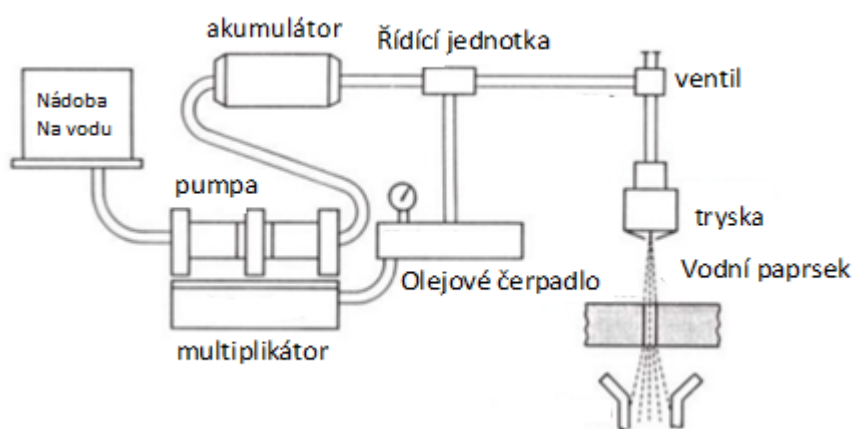
k rozšiřování technologie do různých průmyslových odvětví. Taktéž se postupně zvyšuje pracovní tlak vody. [1]

Na konci minulého století dochází k prudkému rozvoji technologie a kromě komerčního využití se začalo vodním a abrazivním paprskům věnovat také několik vědeckých a vývojových pracovišť po celém světě. Z českých vědců se o výzkum a rozvoj technologie vodního paprsku už v 80. letech 20. století nejvíce zasloužil prof. Jaroslav Vašek z Hornického ústavu ČSAV v Ostravě. Toto pracoviště (v současnosti Ústav geoniky Akademie věd ČR) se zaměřuje na využívání a zdokonalování vodního paprsku pro řezání kovů, hornin, betonů a dalších materiálů, ale také například pro čištění, odstraňování povrchových vrstev nebo úpravu povrchů. V současnosti patří mezi světově uznávaná centra výzkumu a vývoje kapalinových paprsků. [1]

4. Technologie WJ (čistý vodní paprsek)

Je původní metoda využívající usměrněný vodní paprsek. Metoda označená jako WJM (Water Jet Machining) je charakteristická tím, že pro potřeby obrábění využívá pouze běžnou čistou vodu o vysokém tlaku, (pracovní tlak se pohybuje v rozmezí 50 – 650 MPa), filtrací zbavenou škodlivých minerálů a usazenin. Vysokotlaká voda následně prochází vodní tryskou o průměru obvykle do 0,4 mm (podle aplikace), a tím vytvoří velmi úzký, čistý vodní paprskem s obrovskou kinetickou energií, který je schopen postupně mechanicky narušovat obráběný materiál. Takto utvořený paprsek lze použít pro dělení primárně nekovových materiálů či méně houževnatých materiálů jako je papír, lepenka, lamináty, potraviny, lino, guma, pryž, apod. Rychlost řezání se může pohybovat v závislosti na obráběném materiálu a jeho tloušťce v rozsahu několika mm/min (tenké kovy) až po stovky m/min (lepenka, potraviny, papír).

Rychlost proudění kapaliny se pohybuje v rozmezí 600 až 1000 m/s. Metody vodních paprsků jsou charakteristické poměrně dobrou energetickou účinností, což platí i pro metodu WJM. Energetická účinnost může dosáhnout až 60 %. Pro porovnání se energetická účinnost při obrábění paprskem laseru pohybuje jen kolem 10 %. Přesnost výsledného řezu je u obrobků do tloušťky 10 mm $\pm 0,1$ mm. Co se týče materiálů s větší tloušťkou než 10 mm, pak se pohybujeme okolo $\pm 0,2$ mm na metr řezu, přičemž technologií WJM se dají účinně dělit měkké materiály do tloušťky stovek mm. Zjednodušené schéma technologie WJM je znázorněno na obr. 4.1. [2, 15]



Obrázek 4.1-schéma WJ

Zdroj:www.minsover.com

Paprsek čisté vody je původní metoda dělení. První komerční aplikace se objevily v první polovině 70. let minulého století a jednalo se o řezání vlnité lepenky. Dnes se čistou vodou nejčastěji řezou měkké materiály – těsnění, pěna, hedvábný papír, plast, koberce a potraviny. Při řezání hedvábného papíru vytváří vodní paprsek v materiálu méně vlhkosti, než dotek rukou nebo dýchnutí. Čistý vodní paprsek lze také použít k odstranění starých nátěrů, například na lodích.

Vlastnosti čistého vodního paprsku:

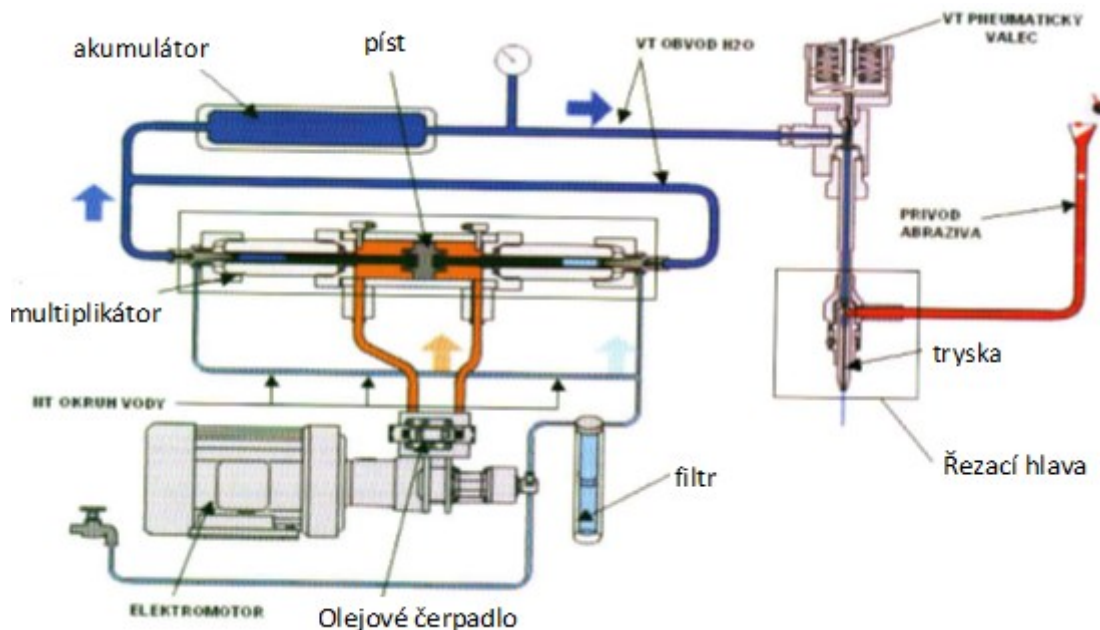
- velmi tenký paprsek (nejčastější průměr je 0,07–0,25 mm),
- opracování i složitých geometrických tvarů,
- minimální ztráta materiálu při řezání,
- nedochází k zahřívání materiálu,
- řezání i silnějších materiálů (podle vlastností),
- řezání velmi tenkých materiálů,
- řezání je obvykle velmi rychlé,
- možnost řezat měkký, lehký materiál (skelnou vatu ve vrstvě až 60 cm silné),
- velmi nízké řezné síly,
- jednoduché upínání,
- nepřetržitý provoz. [16]

5. Technologie AWJ (Abrazivní vodní paprsek)

U abrazivního vodního paprsku proud vody urychlí částice abraziva, které pak narušují řezaný materiál (obrázek 5.1). Abrazivní vodní paprsek je mnohem výkonnější než čistá voda a umožňuje řezat tvrdé materiály, které samotnou vodou řezat nelze (jako například kovy, sklo, kámen, kompozity). Při standardním použití lze abrazivním vodním paprskem řezat prakticky všechny známé materiály, včetně korundu (keramický oxid hlinitý, AD 99,9), diamantu apod. [17]

Vlastnosti abrazivního vodního paprsku:

- mimořádně všestranná metoda,
- absence tepelně ovlivněných zón,
- minimální mechanické namáhání řezaného či obráběného materiálu,
- snadné programování řezného procesu,
- tenký paprsek (průměr 0,5-1,25 mm),
- opracování i složitých geometrických tvarů,
- řezání i tenkých materiálů,
- řezání i materiálů o tloušťce přes 150 mm,
- řezání materiálů ve více vrstvách,
- minimální ztráta materiálu při řezání,
- jednoduché upevnění,
- malé řezné síly (maximálně desítky N),
- jedno nastavení paprsku lze použít pro téměř každou práci,
- snadné přecházení z jedné na více hlav,
- rychlý přechod z čistě vodního paprsku na abrazivní,
- menší potřeba následného opracování,
- minimální nebo žádný otřep. [17]



Obrázek 5.1 – schéma zapojení AWJ [5]

Výstupní průměr zaostřovací trubice je zpravidla větší než u technologie WJ, přičemž nejčastější průměry jsou v rozmezí od 0,75 mm do 2,5 mm. Rychlost proudění pracovního média dosahuje rychlostí 600 m/s až 1100 m/s při pracovním tlaku 250 MPa – 600 MPa. Průměr paprsku více méně odpovídá průměru zaostřovací trubice a nabývá tudíž hodnot od 0,75 mm do 2,5 mm. Vzdálenost mezi koncem zaostřovací trubice a obrobkem se udržuje co nejkratší, ideálně 2 mm, obvykle však kolem 4 mm z důvodu manipulace a přejezdu řezné hlavy nad obrobkem.[3]

AWJ je nekonvenční obráběcí proces, kde se materiál odstraňuje nárazovou erozí vysokého tlaku, vysokou rychlostí vody a smíšené vysoké rychlosti abrazivních částic na obrobku. Různé výhody AWJ způsobily, že se technologie stala jednou z moderních metod používaných v průmyslu při zpracování a obrábění materiálu. AWJ je široce používán při zpracování materiálů, jako je titan, ocel, mosaz, hliník, kámen, sklo a kompozity. Jako moderní technologie výroby se abrazivní řezání vodním paprskem (AWJ) stále častěji používá v různých průmyslových odvětvích. Možné způsoby použití AWJ zahrnuje leštění, vrtání, soustružení, 3D obrábění a frézování. [28]

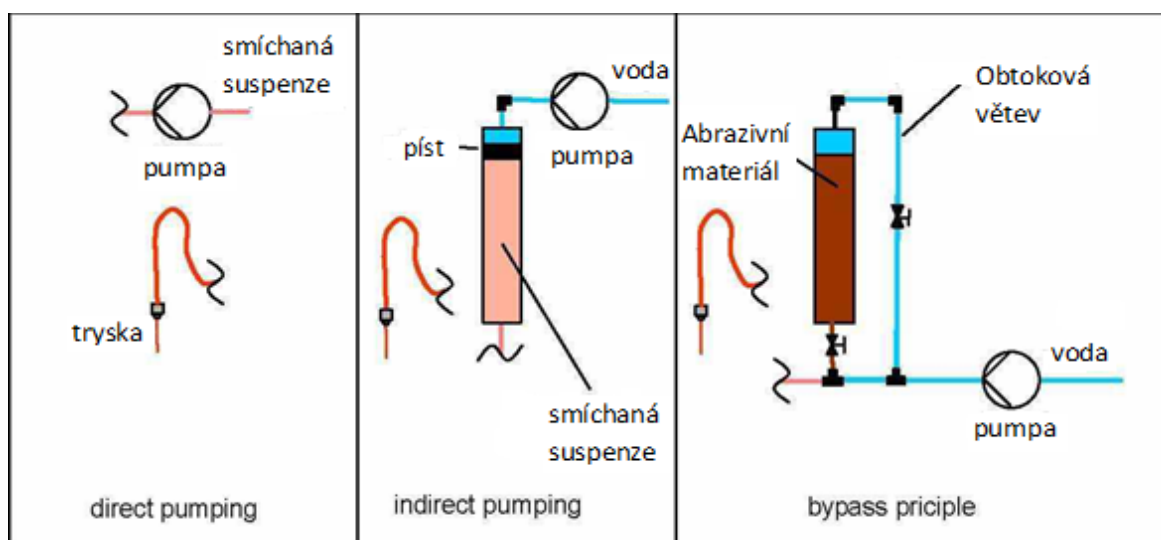
V uplynulých letech se uskutečnilo velké množství výzkumů s cílem pochopit proces a zlepšit jeho výkonnost. H. Hocheng a kol. prověřili proveditelnost frézování abrazivním vodním paprskem pro plasty vyztužené vláknem. Studovali vliv parametrů procesu na rychlost odebrání materiálu a drsnost povrchu pro jednoosé řezání pomocí rozměrové analýzy, později rozšířili studium na multiprocesní řezání. Dr. Arola a Ramulu používali mikrostrukturní analýzu a měření mikrotvrdosti při zjišťování vlivu vlastností materiálu na povrchovou integritu a strukturu. Makroskopická kvalita řezu je hodnocena procesními faktory pro řezání abrazivním vodním paprskem a je experimentálně studována Dr. Hlochem a spol. Získali úroveň kvality povrchu jako funkci parametrů procesu a regresních rovnic pomocí analýzy rozptylu (ANOVA). Zhu a kol. zjistili, že metodou tvárné eroze lze přesně obrábět povrch a provádět obrábění AWJ s nízkým tlakem a s malým úhlem eroze. [29] [30][32]

Pon Selvan a kol. považovali drsnost povrchu za parametr kvality. Pomocí souboru experimentů nastavili parametry pro proces obrábění hliníku. Pomocí experimentů zjistili, že pro dobrou povrchovou úpravu je potřeba větší hydraulický tlak a abrazivní průtok, zároveň je vyžadována nízká rychlost řezání a krátká vzdálenost trysky od materiálu. Řezání abrazivním vodním paprskem bylo demonstrováno jako výhodný proces pro obtížně zpracovatelné materiály. Metin Kök a kol., se soustředili na návrh povrchové drsnosti ploch řezaných AWJ a programování genetické exprese. [32] [33]

Drsnost povrchu při AWJ obrábění kompozitu ze slitiny 7075 Al vyztuženém částicemi Al_2O_3 . byla analyzována v rozvinutých modelech a byly zjišťovány charakteristiky materiálů jako je velikost a hmotnostní podíl vyztužovacích částic, hloubka řezu apod. Vypočtené hodnoty byly porovnány s výsledky experimentů a bylo zjištěno, že jsou uspokojivé. Mnoho vědců demonstrovalo využitelnost těchto modelů.[30]

6. Technologie ASJ (Abrazivní suspenzní paprsek)

Již od 70. let byly vodní trysky používány jako flexibilní nástroj pro řezání měkkých materiálů, jako jsou plasty, pryž, dřevo a textilní materiály. Přidání abrazivního materiálu do vodního paprsku v 80. letech rozšířilo rozsah obráběcích materiálů na prakticky všechny technické materiály včetně kovových a dokonce keramických materiálů. Alternativním abrazivním řezným procesem je tzv. abrazivní suspenzní paprsek. Řezný proces již není prováděn samotnou vodou, jako u technologie WJ, nýbrž abrazivními částicemi rozptýlenými ve vodě (suspenze), přičemž tato suspenze je natlakována na příslušný tlak a poté prochází speciální tryskou za vzniku paprsku. Jedinou funkcí vody je zde zrychlení abrazivních částic. Každá z částic přispívá k řezu mikroerozivním procesem, podobně jako u technologie AWJ. [18]



Obrázek 6.1 –různé způsoby tvorby abrazivního suspenzního paprsek

Zdroj: www.china-weldnet.com

6.1. Způsoby generování abrazivních suspenzních paprsků

Během vývoje ASJ byly zkoumány a použity tři různé způsoby směšování vody a abraziva (obr. 6.1).

Direct pumping – metoda přímého čerpání

Suspenze vody a abraziva je míchána při okolním tlaku, natlakována a čerpána do trysky. I když je tato metoda velmi jednoduchá, nikdy nedosáhla výrazného ekonomického významu, hlavně kvůli vysokému abrazivnímu opotřebení čerpadla během natlakování suspenze. (obrázek 6.1, vlevo) [19]

Indirect pumping – metoda nepřímého čerpání

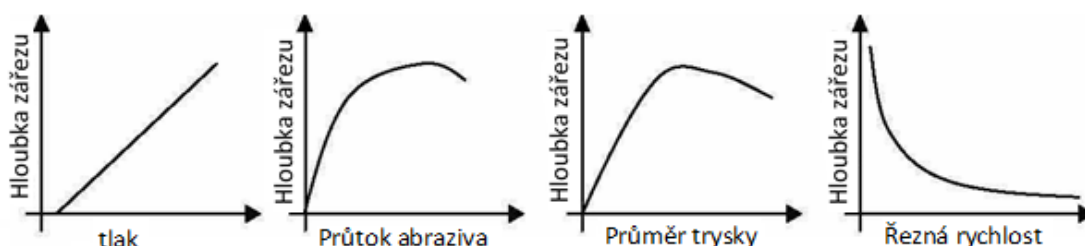
Druhou možností generování ASJ je nepřímé natlakování promixované suspenze (obr. 6.1, střední). Voda je natlakovaná a pohání píst v tlakové nádobě. Píst tlačí předem smíchanou suspenzi z vysokotlaké skladovací nádoby a urychluje proudění v trysce. Za účelem stabilizace suspenze se jako kapalná složka řezného média používá vysoce koncentrovaný roztok polymeru o viskozitě asi o čtyři řády vyšší než má voda. Tímto způsobem byl vytvořen ASJ s vysokým tlakem a koherencí. Limitujícím faktorem je však omezený objem nádoby a tím i doba řezání. Navíc, opotřebení trysky, pístu a ventilů způsobují technologické problémy. To omezilo technologický a ekonomický úspěch tohoto způsobu generování ASJ paprsku [20].

Bypass principle – obtoková metoda

Třetí metodou ASJ je princip obtoku (obrázek 6.1, vpravo). V tomto případě je nejprve natlakována voda. Část průtoku je vedena přes obtokovou větev procházející vysokotlakou skladovací nádobou, která je naplněna abrazivním materiálem. Impulsní výměnou se vylučuje abrazivní materiál z nádoby a směšuje se s hlavním prouděním v mísící komoře, kde se teprve vytváří řezná suspenze. Suspenze je pak transportována a prochází přes urychlovací trysku. Tento způsob generování je také charakterizován omezenou kapacitou abrazivního materiálu. Kvůli skutečnosti, že je skladovací nádoba zcela naplněna abrazivním materiálem, je doba řezání podstatně delší než doba řezání u metody nepřímého čerpání. Navíc neexistuje oddělovací píst a ventily nejsou plněny abrazivním materiálem, takže systémy technologie řezání ASJ generované principem bypassu jsou méně citlivé na opotřebení. [20]

6.2. Vliv hlavních parametrů

Proces řezání abrazivním vodním paprskem je určen technologií mikroskopických abrazivních částic. Jejich potenciál pro odstranění částech řezaného materiálu závisí přímo na jejich rychlosti. Vzhledem k tomu, že abraziva se urychlují vodou, je tlak důležitým parametrem pro účinnost řezání. Nad určitým tlakem se účinnost řezání zvyšuje úměrně s hloubkou drážky. (obrázek 6.2).[21]



Obrázek 6.2-grafy závislostí hloubky řezu na různých parametrech ASJ

Zdroj: www.china-weldnet.com

Dalším důležitým parametrem účinnosti řezání je průtok abraziva, který se týká počtu abrazivních částic. Čím více částic se účastní procesu řezání, tím účinnější je paprsek. Gradient se však snižuje, takže účinnost řezání dosahuje maxima pro určitý průtok (obrázek 6.2). To je způsobeno poměrem vody, urychlující abrazivo, a množstvím abrazivních částic, jejichž větší množství snižuje akceleraci, takže rychlost paprsku je nižší (obrázek 6.2).

Třetím hlavním parametrem je průměr trysky. Zvýšení průměru trysky má několik účinků. Především vede ke zvýšení hydraulické síly, což umožňuje rychlejší akceleraci abrazivních částic. Zvětšený průměr trysek vede také k vyšší stálosti proudu, což je důležité pro řezání při velkých vzdálenostech, jakož i pro řezání složitých konstrukcí. Na druhé straně je zvýšena i šířka řezu, takže v určitém stupni vede nárůst průměru trysek ke snížení účinnosti řezání. (obrázek 6.2).

Parametr, který se však většinou používá k řízení hloubky řezu, je rychlost řezání. Zvýšení rychlosti vede ke snížení hydraulického a abrazivního zatížení řezaného materiálu při posuvu trysky. To vede k závislosti, která je vzájemně úměrná rychlosti řezání. (obr. 6.2) [21]

7. Technologie kavitačních a pulzních paprsků

Erozivní účinek čistého vodního paprsku v kontinuálním režimu se ukázal jako nedostatečný pro řezání většiny tvrdých materiálů. Proto je jeho lokální erozivní účinek často násoben vkládáním tvrdého abrazivního materiálu do proudu kapaliny. [1]

Existuje však i jiná poměrně slibná možnost jak nahradit erozivní účinek abraziva a to implozí kavitačních bublin na rozhraní mezi kapalinou a pevným materiálem. To je charakterizováno velmi vysokou objemovou hustotou uvolněné mechanické energie. Porušení materiálu způsobené zánikem jedné individuální bubliny je nepatrné, ovšem kumulativní efekt může způsobit rozsáhlé porušení. V kavitačním paprsku se různými metodami (vlození válcového tělesa do osy trysky, vytvoření víru v trysce, přerušení toku kapaliny clonami apod.) záměrně vyvolává vznik a růst kavitačních bublin, které zanikají po nárazu paprsku na materiál.

Pulzní proud vody generovaný různými způsoby je další perspektivní volba, jak zvýšit erozivní účinek vodního paprsku. Vodní proud se po výstupu z trysky po nějaké době shlukuje do větších celků a po dopadu na materiál vyvolává v materiálu cyklické impaktní namáhání, které je několikanásobně větší, než při působení kontinuálního paprsku. [22, 6,]

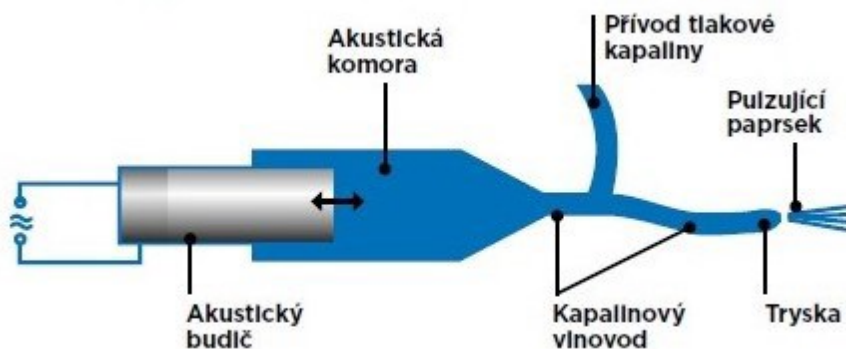
První teoretické práce od Heymanna a Huanga jsou známy již od pozdních šedesátých let minulého století, kdy se sledovala vysoká kumulace mechanické energie během nárazu velmi rychlých kapek na pevný povrch v důsledku působení tzv. „vodního kladiva“ (Water Hammer efekt). Heymann prokázal, že maximální tlak během nárazu kulové kapky kapaliny je několikanásobně vyšší než předpokládané maximum dané klasickou rovnicí pro hydraulický ráz. Uvedený maximální tlak již překračuje stagnační tlak kontinuálního paprsku několikrát. Teoretické předpovědi byly potvrzeny experimenty provedenými Smithem a Kinslowem [22].

Kromě vysokých maximálních hodnot tlaku byl rovněž zlepšován erozivní účinek pulsní trysky díky extrémní dynamice periodických rázových vln v místě nárazu paprsku. To vede k vysokým deformačním rychlostem a zvýšené pravděpodobnosti křehkého lomu. Jedním

z dalších erozních mechanismů, které je třeba vzít v úvahu u pulzních paprsků, je intenzita (frekvence) pulzů a kavitace.

Při použití pulzujícího paprsku pro ošetření betonových povrchů při tlaku vody (cca 30 MPa – 70 MPa) bylo dosaženo stejných desintegračních účinků jako u standardních vysokotlakých zařízení při tlaku vody (cca 150 MPa – 200 MPa).[22]

Aby se dosáhlo vytvoření shluků kapaliny při vysoké frekvenci, navíc v prostředí o relativně vysokém tlaku, využívá se pro generování ultrazvuková modulace, která se po létech vývoje ukázala pro generování pulzního paprsku jako nejlepší řešení.[23] Jeden z možných způsobů generování pulzujícího paprsku je využití tzv. akustického budiče (obrázek 7.1), který generuje tlakové pulzace do akustické komory naplněné kapalinou, přičemž pulzace se přenáší kapalinovým vlnovodem do trysky, kde se mění na pulzace rychlostní. [24]



Obrázek 7.1 Princip generování pulzujícího vodního paprsku [24]

8. Hlavní části systému vodního paprsku

8.1. Elektromotor

Elektromotory jsou součástí systémů čerpadel. Pohánějí klikovou hřídel u rotačních čerpadel s přímým pohonem (tzv. plunžrových čerpadel) nebo olejové čerpadlo u multiplikátorů. Otáčení motorů tak zajišťuje pohyb stroje.[7]

8.2. Olejové čerpadlo

Olejová čerpadla jsou výkonné prvky hydraulického systému schopné vyvinout i značné momenty zpravidla ve velkém rozsahu otáček. Ve vysokotlakých systémech jsou využívána pro dopravu oleje do primárního okruhu vysokotlakého čerpadla na obě strany velkého pístu u multiplikátorů podle pozice řídicího šoupátka. Svým konstrukčním principem jsou téměř totožné s vodními čerpadly stejného typu. Vstupními veličinami olejových čerpadel jsou tlak a průtok, výstupními pak moment a otáčky. [8]

Ve srovnání s jinými principy motorů (například elektromotory) se olejová čerpadla stejných parametrů vyznačují velmi nízkou hmotností, malým setrvačným momentem a snadným řízením.

8.3. Čerpadla

8.3.1. Rotační čerpadlo s přímým pohonem

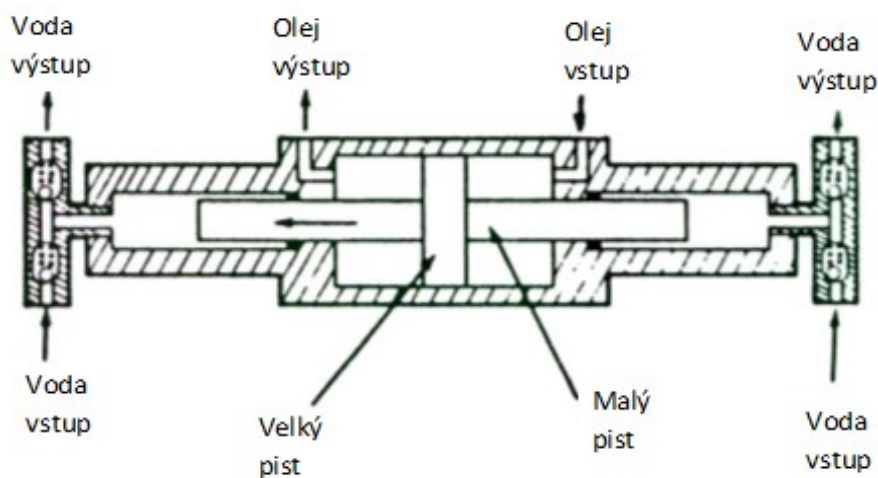
Rotační čerpadla s přímým pohonem lze najít ve více než 20 % systémů s vodním paprskem ve světě. Tato čerpadla na rozdíl od multiplikátorů nemají hydraulický okruh. Někdy se označují jako triplexová čerpadla (v případě tří pístů), kde elektromotor otáčí klikovou hřídel se třemi písty a ty generují po stlačení vody ve válcích velmi vysoký tlak.[7]

Na generování vysokých tlaků, na čištění a řezání se používají zařízení na bázi více pístových hydrogenerátorů (čerpadel). Běžné pracovní tlaky čerpadel s přímým pohonem jsou na úrovni do 320 MPa při hydraulickém výkonu až 180 kW. [3] Současné světové maximum tlaku z hlediska těchto vysokotlakých zařízení je 380 MPa. [9]

8.3.2. Multiplikátor (zesilovač tlaku)

Elektromotor pohání hydrostatický olejový generátor, který dodává hydraulickou kapalinu (olej) do primárního nízkotlakého hydraulického obvodu. Rozvaděč vede střídavě kapalinu do obou nízkotlakých sekcí multiplikátoru. Při pohybu pístu multiplikátoru vpravo je nasávána kapalina do levého prostoru vysokotlaké části multiplikátoru. Kapalina je před vstupem do multiplikátoru vedena přes filtr. Při pohybu pístu multiplikátoru vlevo se uzavře sací ventil a otevře se výtlačný ventil, kterým je nyní vedena vysokotlaká kapalina do akumulátoru a potom do trysky (řezací trysky). Úkolem akumulátoru v obvodu je vyrovnávat tlakové pulsace vznikající při změně orientace pohybu pístu i stlačitelnost vody. Při pohybu pístu vlevo je kapalina nasávána do pravého prostoru vysokotlaké části multiplikátoru a cyklus se takto opakuje. Akumulátor tlaku využívá stlačitelnosti vody, která při tlaku 400 MPa dosahuje cca 13%. [5]

Generátor vysokého tlaku s multiplikátorem je kompaktní zařízení s propracovanou konstrukcí obsahující všechny potřebné komponenty pro komfortní provoz. (obr. 8.1.)



Obrázek 8.1 – schéma multiplikátoru tlaku [6]

Zařízení s multiplikátorem se používají převážně na řezání vysokorychlostním vodním paprskem. Od roku 1980 se používají nejen na řezání čistým, ale i abrazivním vodním paprskem. Samozřejmě, konstrukce zařízení a aplikace se neustále rozvíjejí a mnohé jsou teprve ve stádiu zkoumání a vývoje.[9]

8.4. Řezací hlava

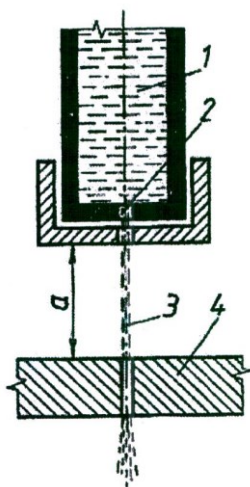
Řezací hlava vodního paprsku je místem, kde je vysoký tlak vody převeden na vysokou rychlost proudu při průchodu tryskou z polodrahokamu [9]. Při řezání standardním vysokorychlostním vodním či abrazivním paprskem je proud udržován ve správné pozici vůči řezanému materiálu, což je umožněno vhodným nasměrováním řezné hlavy. Potom vysokorychlostní vodní proud, dosahující nadzvukových rychlostí, urychluje abrazivní částice a eroduje materiál. Dokáže pak řezat tvrdé materiály, jako jsou kovy, sklo, kámen a kompozity [10]. Při řezání abrazivním vodním paprskem je součástí hlavy také směšovací komora a zaostřovací trubice. Někdy se ve spojení s řeznou hlavou hovoří také o on-off ventilu. Tento ventil je v místě těsně nad tryskou a využívá jistý typ jehly a sedla a umožňuje operátorovi nebo řídicímu systému stroje vodní paprsek spustit a zastavit.[11]

Řezací hlavy se rozdělují do dvou základních skupin, které se jmenují podle technologie vodního paprsku.

- řezací hlava pro WJ
- řezací hlava pro AWJ

8.4.1. Řezací hlava pro WJ

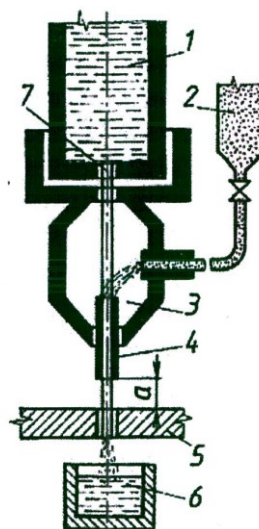
Řezací hlava pro WJ (čistý kapalinový paprsek) se používá pro obrábění měkkých a málo houževnatých materiálů. Skládá se z tlakové kapaliny (1) a trysky (2). Vodní paprsek (3) pak řeže příslušný materiál (4).



Obrázek 8.2 –Řezací hlava pro WJ [3]

8.4.2. Řezací hlava pro AWJ

Řezací hlava pro AWJ (abrazivní vodní paprsek) se používá pro obrábění tvrdých a houževnatých materiálů. Skládá se podobně jako u WJ z tlakové kapaliny (1) a trysky (7). Řezací hlava pro AWJ obsahuje navíc směšovací komoru (3) a zaostřovací trubici (4). Zásobník abrasiva (2) není součástí hlavy a abrazivo je do ní přiváděno ohebnou hadicí.



Obrázek 8.3- Řezací hlava pro AWJ [3]

8.5. Tryska

K vytvoření vysokorychlostního vodního paprsku je nutno převést vodu o vysokém tlaku na proud pohybující se velkou rychlostí. Tento převod probíhá při průchodu vysokotlaké vody malou tryskou zhotovenou z drahých kamenů. Otvor v trysce ze safíru, rubínu nebo diamantu, má rozměr 0,07–0,50 mm (nejběžnější velikost je 0,35 mm). Čím větší otvor, tím více vody a větší výkon čerpadla je k udržení tlaku zapotřebí. Velikost otvoru v trysce neurčuje maximální tlak vody – ten je dán pouze výkonem a konstrukcí čerpadla. Okraj trysky má velmi ostrou hranu, aby byl vodní proud koherentní. Drsná nebo zaoblená hrana bude vytvářet rozptýlený a turbulentní proud, který se může nežádoucím způsobem odchýlit.[9]

Ke zničení trysky může dojít ze dvou základních příčin. Za první, může se vytvořit vodní kámen, při jehož uvolnění dojde k okamžitému selhání trysky. Za druhé, narážející částice mohou hranu otvoru ohladit nebo odštípnout. Tryska je při řezání vodním paprskem obvykle buď dobrá, nebo špatná – postupná degradace je méně častá. Safírové a rubínové

trysky vydrží při kvalitní vodě 40 až 300 hodin, v závislosti na aplikaci a tlaku. Diamant může být 8–10x dražší, ale také 8–10x déle vydrží.[12]

8.6. Zaostřovací trubice

Zaostřovací trubice je umístěna na samém konci řezné hlavy. Používá se při řezání abrazivním vodním paprskem. Když voda prochází tryskou z drahokamu, tlak vody se mění na rychlost proudu. Vodní paprsek dosahující nadzvukové rychlosti pak vstupuje do směšovací komory, kam je pomocí Venturiho efektu přisáváno abrazivo. Obě látky procházejí zaostřovací trubicí a opouštějí hlavu jako směs vody, abraziva a malého množství vzduchu.[9]

Zaostřovací trubice má vnitřní průměr 0,4–1,8 mm a je 22–150 mm dlouhá. Je vybavena vnitřním vstupním kuzelem. Trubice má nejčastěji vnitřní průměr 1 mm, je cca 100 mm dlouhá. Obvykle se do ní používá granátový písek o zrnitosti Mesh 80. Při obvyklém způsobu řezání se u trubice vyrobené z vysoce kvalitního materiálu, (kompozitní karbid s nanočásticovou strukturou a minimem pojiva, zajišťující maximální odolnost proti otěru), opotřebením rozšíří trubice přibližně o 0,025 mm za 6 až 8 hodin, a toto opotřebení je symetrické.[13]

8.6.1. Venturiho efekt

Jedná se o efekt, kdy při vysoké rychlosti proudící kapaliny nebo jiného média vzniká při přechodu ze širší do užší části trubice podtlak. Při abrazivním řezání vodním paprskem dochází průchodem proudu čisté vody přes širší směšovací komoru do úzké zaostřovací trubice k Venturiho efektu.[9]

Abraziva jsou následně vlivem Venturiho efektu vtažena do směšovací komory, urychlena a vystřelena ze zaostřovací trubice jako kulka z pušky, čímž vzniká abrazivní vodní paprsek.[13]

9. Příměsi

9.1. Abraziva

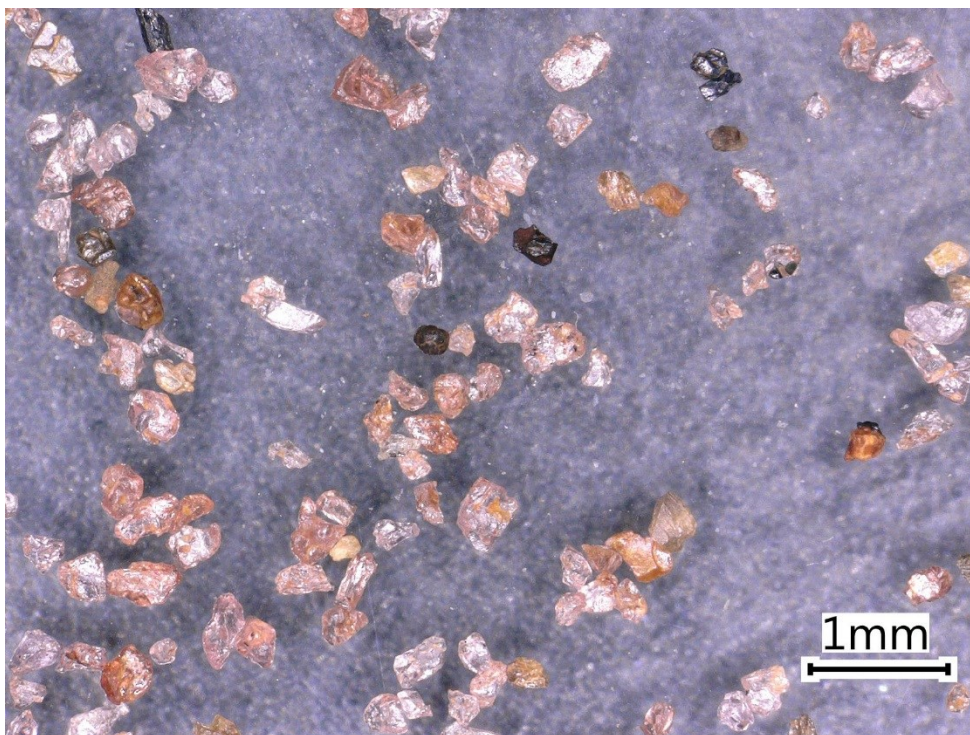
Granátové abrazivo se používá u 99 % všech vodních řezacích strojů díky svým řezacím schopnostem, homogenitě, ceně, menšímu opotřebení řezací hlavy a ekologické a zdravotní nezávadnosti. Velikost částic se při řezání vodním paprskem obvykle pohybuje v rozmezí 0,07 až 0,3 mm, nejběžnější hodnota je 0,18 mm. Běžně se zrnitost abraziva udává v jednotkách mesh. Čím vyšší hodnota mesh, tím jemnější jsou zrna abraziva. Zrnitost mesh 320 jsou částice podobné prachu.[14]

Jak již bylo uvedeno, abrazivní vodní paprsek je vhodný zejména pro obrábění pevných a těžkoobrobitelných materiálů. Přimíchávání abrazivního materiálu do čistého vodního paprsku probíhá v tzv. směšovací komoře, která je součástí řezací hlavice. Směšovací komora má specifický tvar a velikost. Vodní paprsek je formován ve vodní trysce, odkud vytéká souvislý paprsek pracovní kapaliny odpovídající vysokou rychlostí. Paprsek vstupuje do směšovací komory, která má větší průměr než vodní tryska. V důsledku expanze kapaliny se ve směšovací komoře mění laminární proudění na turbulentní, přičemž vzniká odtrhávání svrchních lamel kapaliny, způsobující víření a vznik podtlaku v směšovací komoře. Tento podtlak strhává a přisává přes přívodní hadici (ze zásobníku) příslušné abrazivo, které je pak v komoře strháváno paprskem kapaliny. Tím dochází k částečné transformaci kinetické energie kapaliny do abrazivních částic. Cílem procesu směšování je dosažení rovnoměrného rozptýlení zrn určeného objemu abraziva v proudu kapaliny. [5]

Výběr správného abraziva je velmi důležitý, protože náklady na abrazivo představují téměř největší položku při řezání abrazivním vodním paprskem - AWJ. Při výběru vhodného abraziva většinou volíme kompromis mezi následujícími faktory:

- tvrdost abraziva - tvrdší abrazivo má vyšší účinnost při řezání, přičemž dochází k rychlejšímu opotřebení abrazivní trysky,
- velikost abrazivních zrn - řezáním menšími částicemi se dosahuje nižší drsnost povrchu, ale úměrně se prodlužuje čas potřebný k prořezání materiálu, velikost zrna se udává v jednotkách MESH, což označuje počet ok síta na délku jednoho palce (např. udávaná velikost zrna MESH 80 odpovídá velikosti zrna cca 0,180 mm),

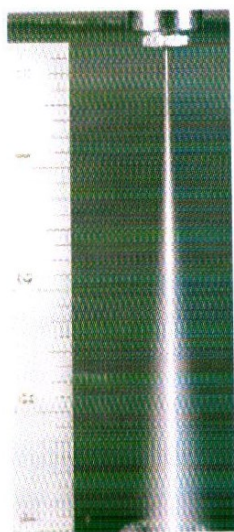
- tvar abrazivních zrn - vyznačuje se kruhovitostí, použitím kulatějších zrn docílíme menší drsnost povrchu na úkor dosažené maximální hloubky řezu,
- hmotnostní tok abraziva - se zvyšujícím se hmotnostním tokem se zvyšuje hloubka řezu, protože se zvyšuje kinetická energie paprsku, při překročení kritického hmotnostního toku abraziva maximální dosahovaná hloubka řezu klesá (uvádí se např. v kg/min),
- ekologické vlastnosti abraziva - ne všechny technicky a ekonomicky vhodné abraziva splňují bezpečnostní požadavky a požadavky na zdravotní nezávadnost,
- cena abraziva - levnější abraziva mají menší účinnost, ale ta není v lineárním vztahu k charakteristice produktivity. [5]



Obrázek 9.1 – indický granát

9.2. Stabilizátor proudění

Stabilizátor proudění (aditivum do vody) - jsou to přídavky různých polymerů s lineárními molekulami. Roztok vody s polymery typu PAA (polyakrylamid) nebo PEO (polyetyloxid) vytváří souvislý koherentní paprsek ještě ve velké vzdálenosti od trysky. Paprsek je pak při řezání účinnější, energie koncentrovanější a paprsek si zachovává kompaktní jádro (polymery zabraňují nadměrné turbulenci proudění). Úprava vody polymery se vyžaduje např. při vytváření ostrých hran na dělených dílcích. [5]



Obrázek 9.2- proudění bez stabilizátoru [5]



obrázek 9.3 proudění s stabilizátorem [5]

10. Experiment

Experiment byl zaměřen na frézování tvrdé keramiky pomocí vysokorychlostního abrazivního paprsku. První fáze byla zaměřena na zjištění vhodných parametrů k frézování. K tomuto úkonu bylo vyfrézováno 30 experimentálních drážek. Následovalo zhodnocení a výběr nejvhodnějších parametrů frézování. V druhé fázi proběhla výroba (vybrání) 16 kapes o rozměru 10 x 10 dvěma strategiemi podle vybraných parametrů. Závěrem byly kapsy změřeny a vyhodnoceny podle úběru materiálu a hloubky kapsy.

10.1. Experimentální materiál

Experimentální materiál se používá pro vyložení ploch vysoce namáhaných otěrem abrazivních materiálů (doprava drceného uhlí, mletí keramických surovin apod.). Desky jsou k podkladovému materiálu (obvykle ocelový plech) lepeny. Jedná se o korundovou keramiku o obsahu 92% Al_2O_3 a její kvalita a vlastnosti jsou plně srovnatelné s obdobnými výrobky renomovaných zahraničních výrobců. [26]

Oxid hlinitý (Al_2O_3) je krystalická látka, obvykle bílé barvy, která vzniká při spalování hliníku nebo dehydratací hydroxidu hlinitého. Oxid hlinitý se v přírodě vyskytuje jako velmi tvrdý nerost korund. Odrůdy korundu jsou smírek a drahé kameny – modrý safír a červený rubín. Surovinou pro výrobu oxidu hlinitého je bauxit. Jedná se o tepelně velmi odolnou sloučeninu, která má ovšem amfoterní povahu. Díky svojí netoxicitě se využívá jako plnivo do látek denní potřeby, slouží jako katalyzátor, díky vysoké tvrdosti se používá jako abrazivo a hlavně je meziproduktem při výrobě hliníku z bauxitu. [25]

10.2. Použité zařízení

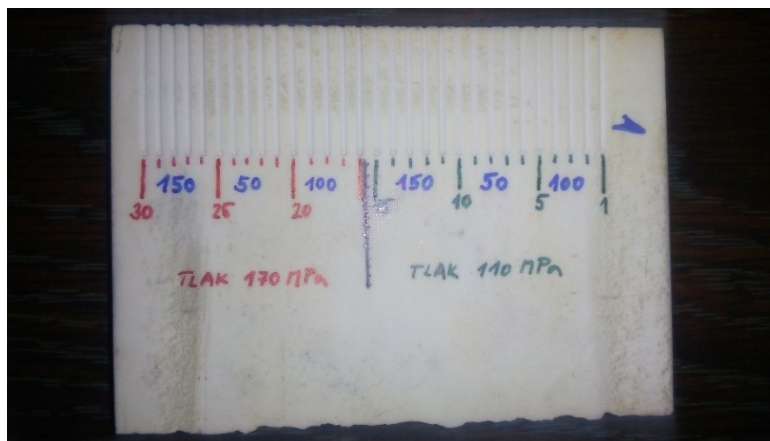
Řezání bylo prováděno na pracovišti Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., s použitím řezacího zařízení českého výrobce PTV. Řezací zařízení bylo tvořeno řezacím CNC stolem X-Y PTV WJ2020-2Z-1xPJ – 2D s naklápěcí řeznou hlavou, speciálně navrženým pro řezání vodním paprskem, a vysokotlakým multiplikátorovým čerpadlem PTV75-60 se dvěma multiplikátory tlaku (pracovní tlak 40 – 415 MPa, max. průtok 7,8 l/min při 415 MPa) vyvolávajícím tlak potřebný k řezání. Pro zjištění velikosti, tvaru, a šířky drážek a kapes byl použit mobilní digitální mikroskop Keyence VHX 5000 s příslušenstvím.

10.3. Experimentální drážky

Experimentální drážky jsou zaměřeny na srovnání hlavních parametrů (tlak, průtok abraziva, posuvná rychlost paprsku) při zhotovování drážek (obrázek 10.1) řezaných vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. Ke zkoušce byl použit keramický materiál 92% Al_2O_3 o rozměrech 200x100x30. Všech 30 experimentálně vyrobených drážek bylo o stejné délce 50 mm. Srovnávací parametry (tlak, průtok abraziva, posuvná rychlost paprsku) byly voleny pro každou drážku zvlášť- viz tabulka.

č. drážky	tlak [MPa]	Průtok abroaziva m_a [g/min]	v [mm/min]	hloubka drážky [mm]	šířka drážky [mm]
1	110	100	300	0,45	1,16
2	110	100	400	0,37	1,19
3	110	100	500	0,28	1,09
4	110	100	600	0,24	1,11
5	110	100	700	0,18	0,91
6	110	50	300	0,31	1,10
7	110	50	400	0,19	1,11
8	110	50	500	0,12	0,98
9	110	50	600	0,10	1,00
10	110	50	700	0,09	1,07
11	110	150	300	0,56	1,22
12	110	150	400	0,45	1,18
13	110	150	500	0,30	1,06
14	110	150	600	0,25	1,04
15	110	150	700	0,19	1,11
16	170	100	300	0,67	1,21
17	170	100	400	0,60	1,15
18	170	100	500	0,48	1,14
19	170	100	600	0,38	1,12
20	170	100	700	0,32	1,04
21	170	50	300	0,46	1,16
22	170	50	400	0,32	1,15
23	170	50	500	0,25	1,12
24	170	50	600	0,21	1,18
25	170	50	700	0,15	1,00
26	170	150	300	0,84	1,30
27	170	150	400	0,71	1,24
28	170	150	500	0,57	1,23
29	170	150	600	0,49	1,23
30	170	150	700	0,45	1,16

Tabulka 10.1-Parametry drážek



Obrázek 10.1 – Experimentální drážky

Následně byly vybrány nejvhodnější parametry pro obrábění čtvercových kapes o rozměrech 10 x 10. Tlak o hodnotě 110MPa a 170MPa, průtok abraziva 100g/min a posuvná rychlost paprsku 400 mm/min byly vybrány jako hodnoty parametrů pro další experimenty. Kapsy byly vyrobeny dvěma strategiemi a následně bylo zjištěno, která ze strategií byla výhodnější.

První strategie je založena na konvenčním, přímočarém a vratném pohybu, nazývaném frézování s konstantním krokem. Podstatou je otočení o 90° při každém dalším průchodu, aby se nevytvořil důlek na povrchu obrobku při zpomalení obrábění. Při procesu obrábění byly naměřeny parametry viz. tabulka 10.2:

Počet přejezdů	hloubka h [mm]		objem V [mm ³]	
	110 MPa	170 MPa	110 MPa	170 MPa
2	0,64	1,16	50,53	86,56
4	1,35	2,43	112,77	196,24
6	2,01	3,68	168,14	302,11
8	3,01	4,75	241,44	407,54

Tabulka 10.2 - dosažené parametry lineární kapsy

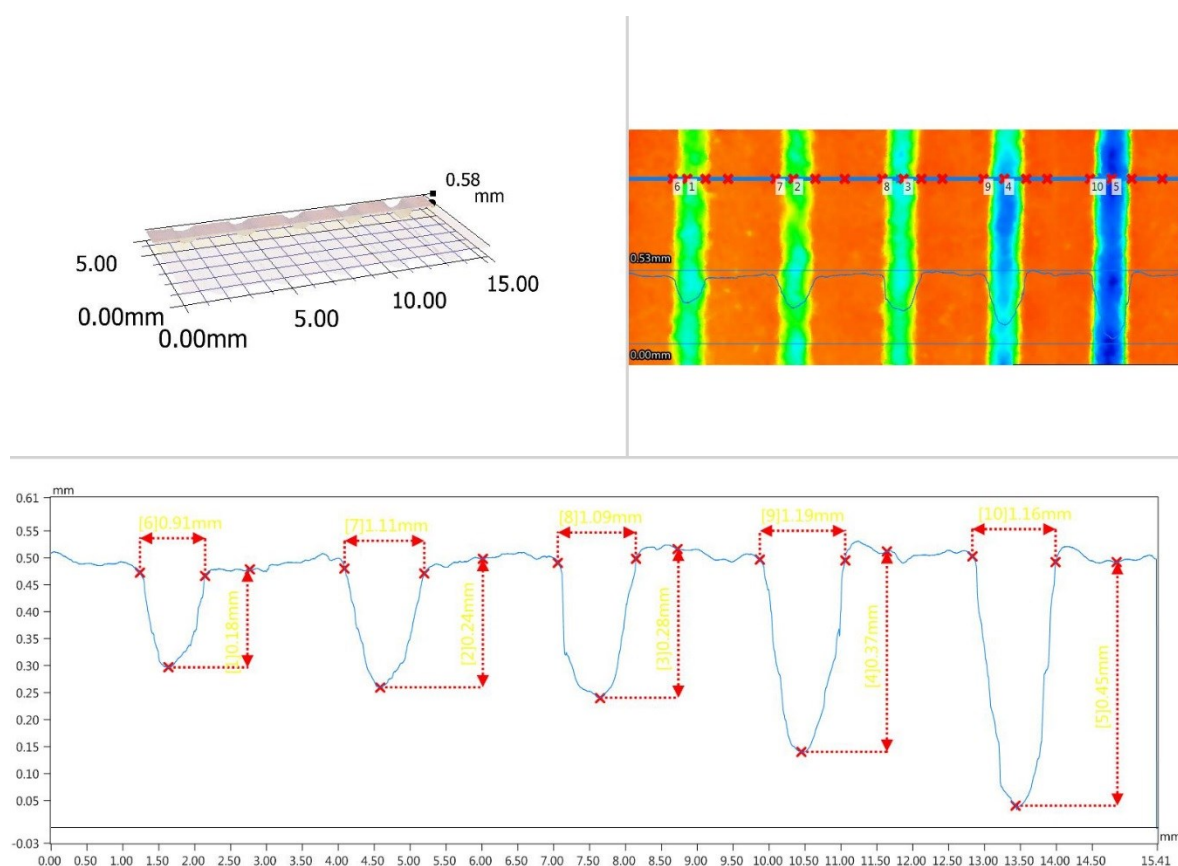
Druhá strategie je založena na spirálovém pohybu kolem obrysu a se směrem do středu kapsy. Při procesu obrábění byly naměřeny parametry viz tabulka 10.3:

počet přejezdů	SPIRÁLA			
	hloubka h [mm]		objem V [mm ³]	
	110 MPa	170 MPa	110 MPa	170 MPa
1	0,78	1,57	44,65	101,82
2	1,78	2,93	121,04	209,01
3	2,32	3,91	179,34	298,13
4	2,95	5,09	241,53	386,33

Tabulka 10.3 – dosažené parametry spirálové kapsy

10.3.1. Drážky 1-5

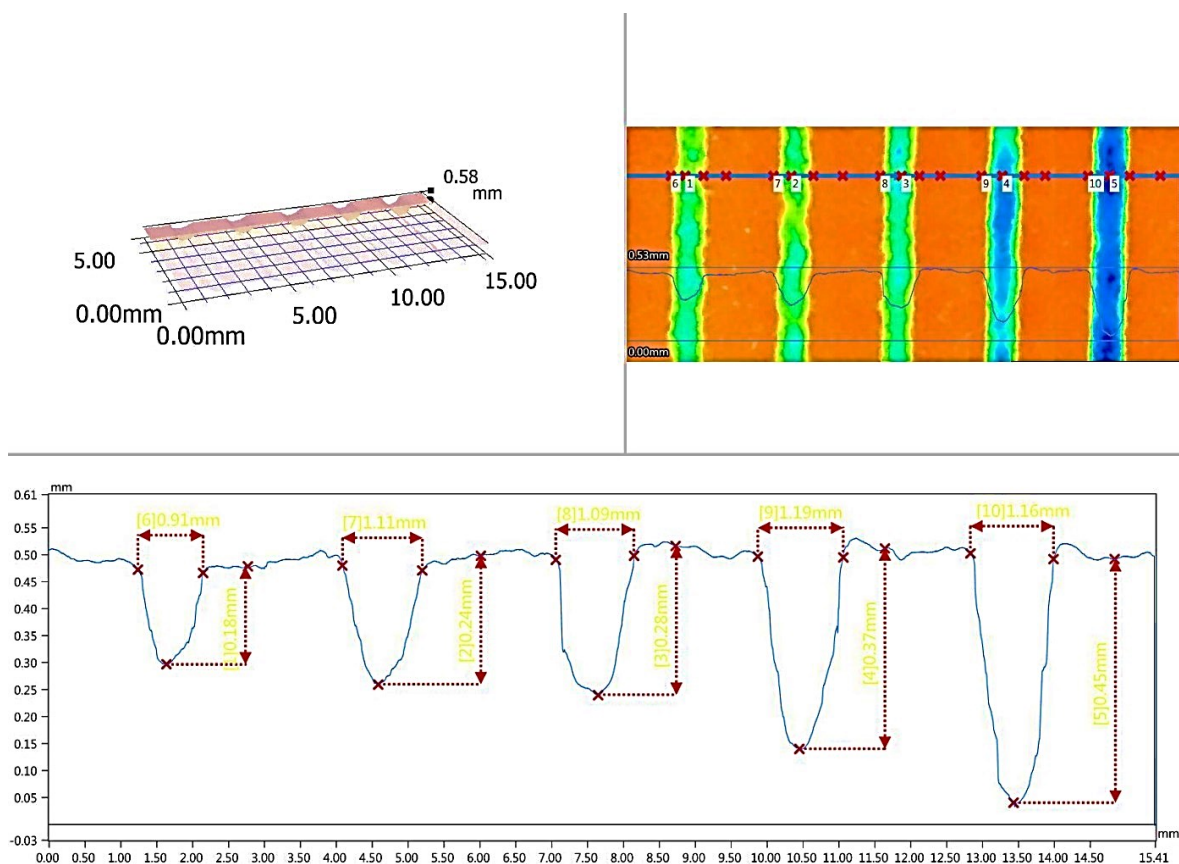
Experimentální drážky byly frézovány při 5 různých rychlostech posuvu (300, 400, 500, 600 a 700 mm/min) a stálém tlaku vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku $p=110$ MPa a stálého průtoku abraziva $m_a = 100$ g/min. Drážky byly změřeny na optickém mikroskopu Keyence VHX 5000. Výpočetní a grafickou porovnávací metodou byly zjištěny nejlepší řezné parametry pro experiment frézování pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku.



Obrázek 10.2-drážky 1-5

10.3.2. Drážky 6-10

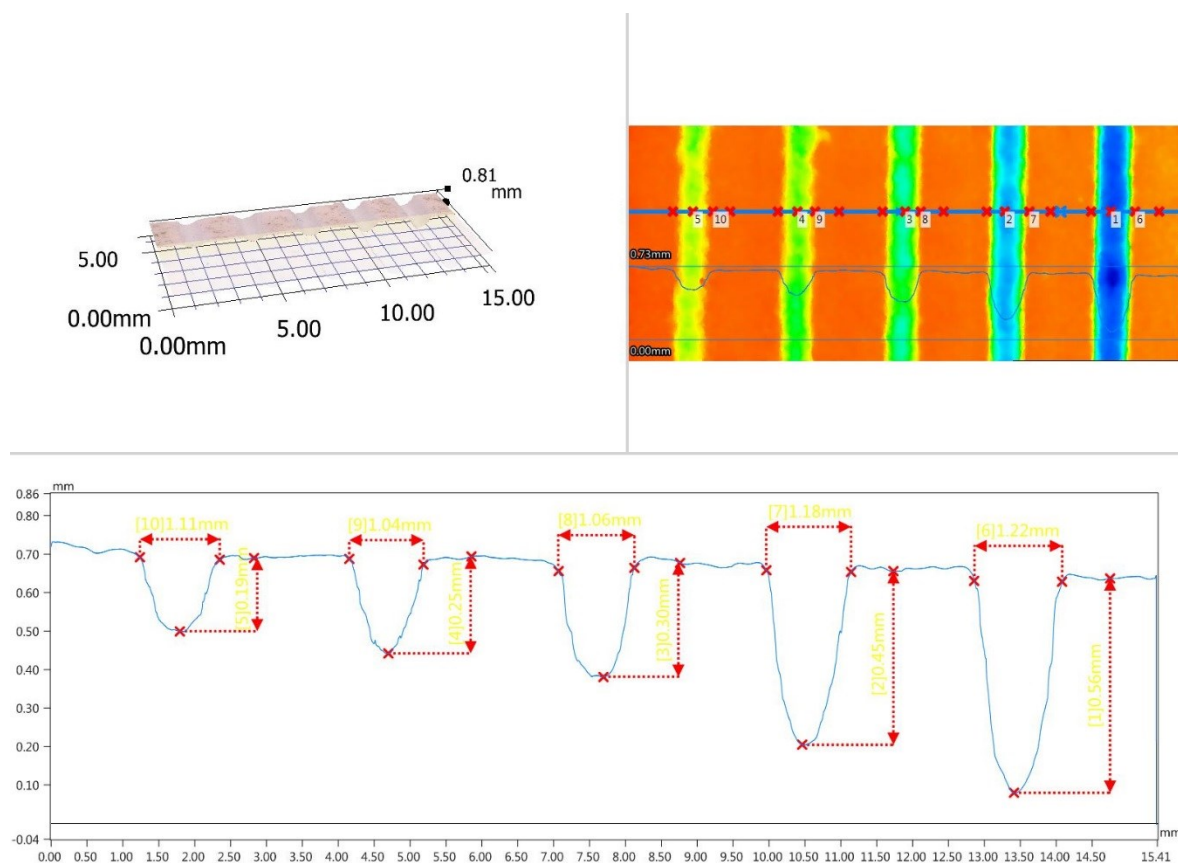
Experimentální drážky byly frézovány při 5 různých rychlostech posuvu a stálém tlaku vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku $p=110$ MPa a stálého průtoku abraziva $m_a = 50$ g/min. Drážky byly změřeny na optickém mikroskopu Keyence VHX 5000. Výpočetní a grafickou porovnávací metodou byly zjištěny nejlepší řezné parametry pro experiment frézování pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku.



Obrázek 10.3-drážky 6-10

10.3.3. Drážky 11-15

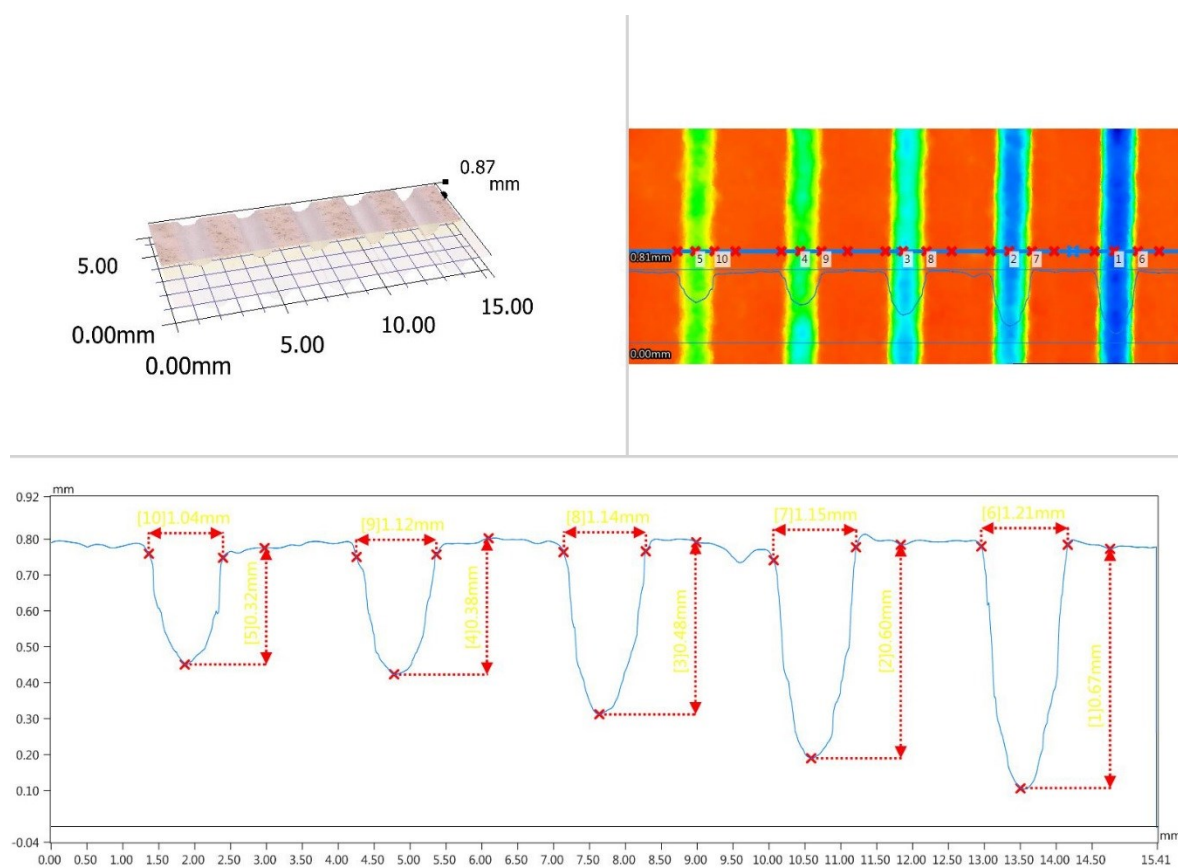
Experimentální drážky byly frézovány při 5 různých rychlostech posuvu a stálém tlaku vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku $p=110$ MPa a stálého průtoku abraziva $m_a = 150$ g/min. Drážky byly změřeny na optickém mikroskopu Keyence VHX 5000. Výpočetní a grafickou porovnávací metodou byly zjištěny nejlepší řezné parametry pro experiment frézování pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku.



Obrázek 10.4-drážky 11-15

10.3.4. Drážky 16-20

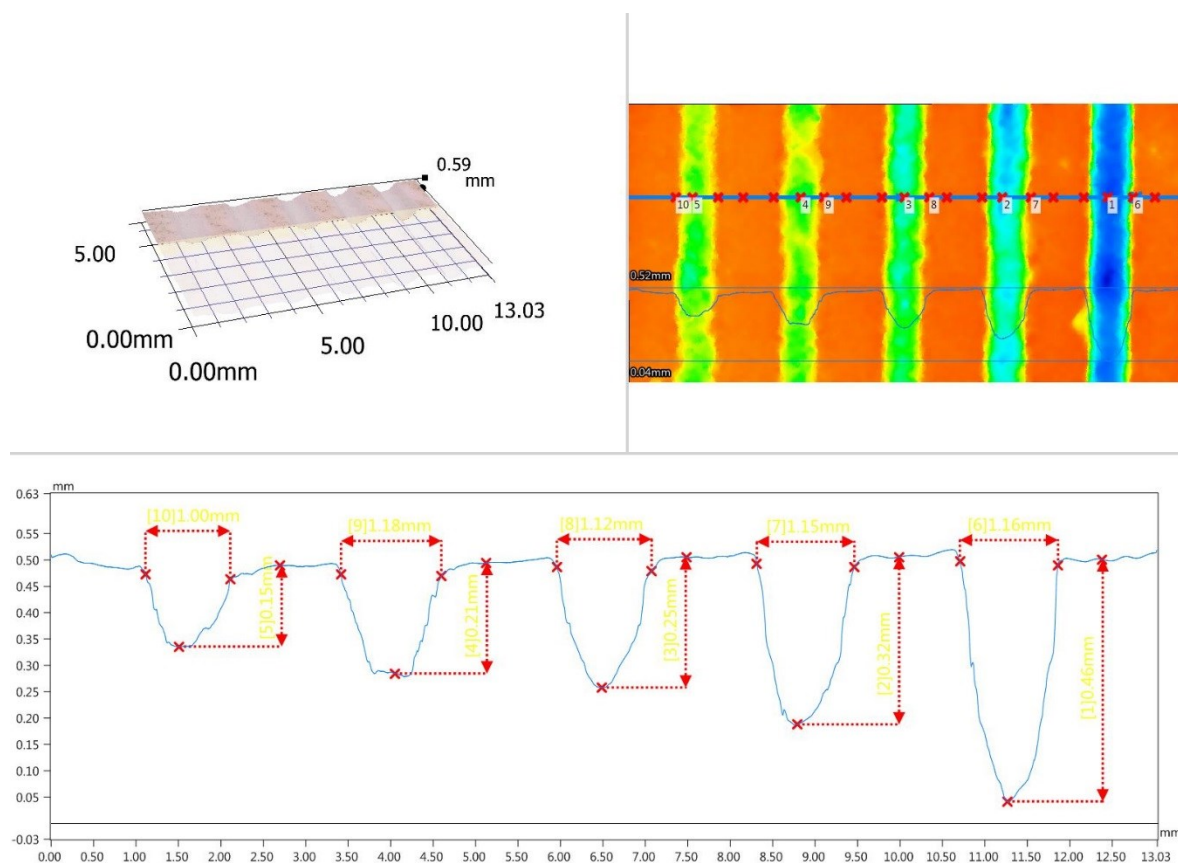
Experimentální drážky byly frézovány při 5 různých rychlostech posuvu a stálém tlaku vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku $p=170$ MPa a stálého průtoku abraziva $m_a = 100$ g/min. Drážky byly změřeny na optickém mikroskopu Keyence VHX 5000. Výpočetní a grafickou porovnávací metodou byly zjištěny nejlepší řezné parametry pro experiment frézování pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku.



Obrázek 10.5-drážky 16-20

10.3.1. Drážky 21-25

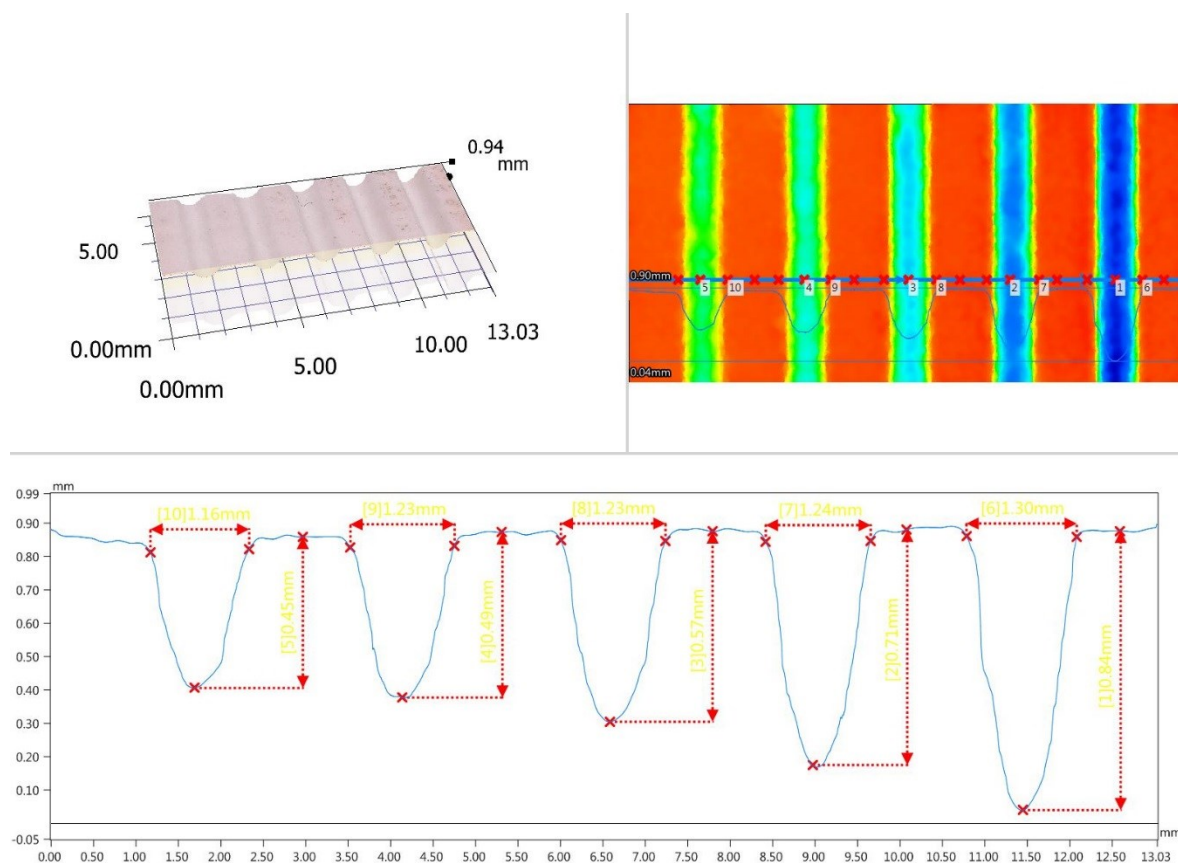
E Experimentální drážky byly frézovány při 5 různých rychlostech posuvu a stálém tlaku vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku $p=170$ MPa a stálého průtoku abraziva $m_a = 50$ g/min. Drážky byly změřeny na optickém mikroskopu Keyence VHX 5000. Výpočetní a grafickou porovnávací metodou byly zjištěny nejlepší řezné parametry pro experiment frézování pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku.



Obrázek 10.5-drážky 20-25

10.3.1. Drážky 26-30

Experimentální drážky byly frézovány při 5 různých rychlostech posuvu a stálém tlaku vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku $p=170$ MPa a stálého průtoku abraziva $m_a = 150$ g/min. Drážky byly změřeny na optickém mikroskopu Keyence VHX 5000. Výpočetní a grafickou porovnávací metodou byly zjištěny nejlepší řezné parametry pro experiment frézování pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku.



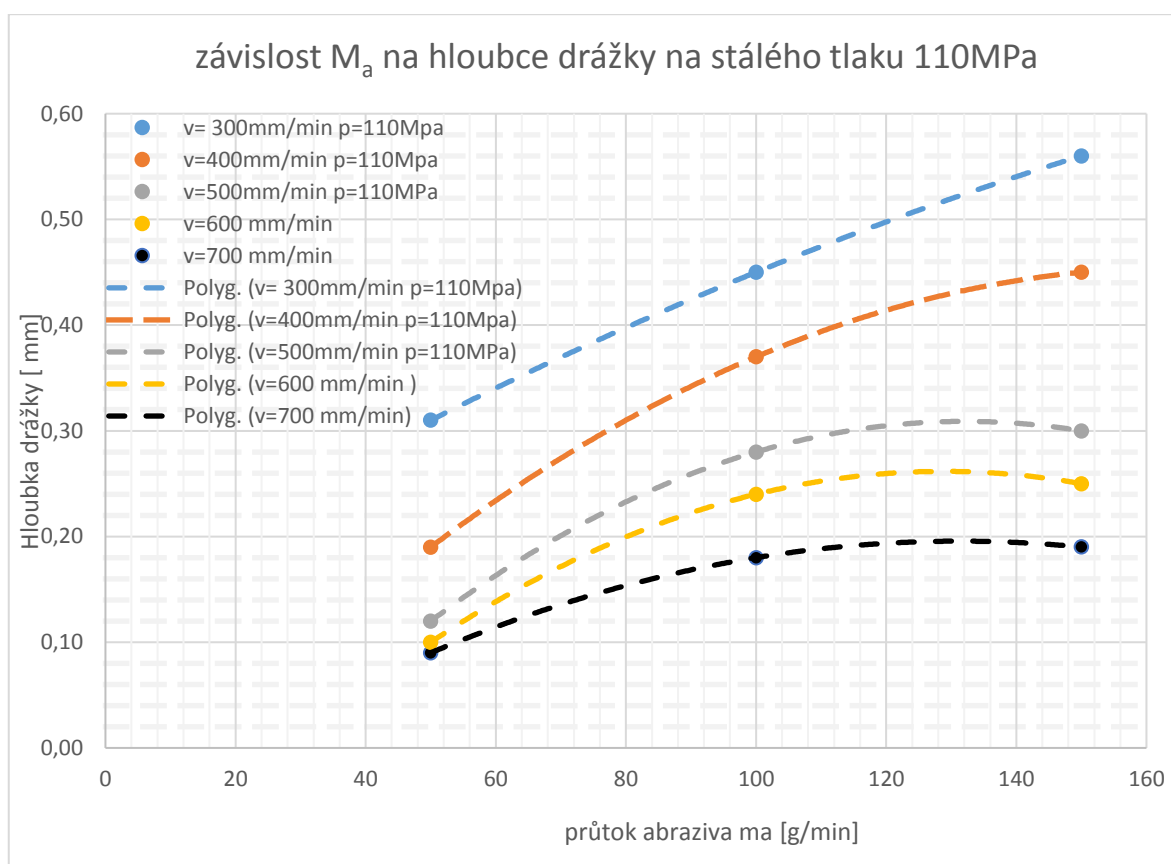
Obrázek 10.6-drážky 26-30

10.4. Vyhodnocení experimentálních drážek

Tlak

Tlak je jeden z nejdůležitějších parametrů systému vodního paprsku, proto je vybírán mezi prvními parametry. Pro tlak platí, bez ohledu na materiál a tloušťku, že pokud parametry řezání zůstávají konstantní, souběžně se zvyšujícím se tlakem se zvyšuje i hloubka řezu (viz obr. 10.2 až 10.6)

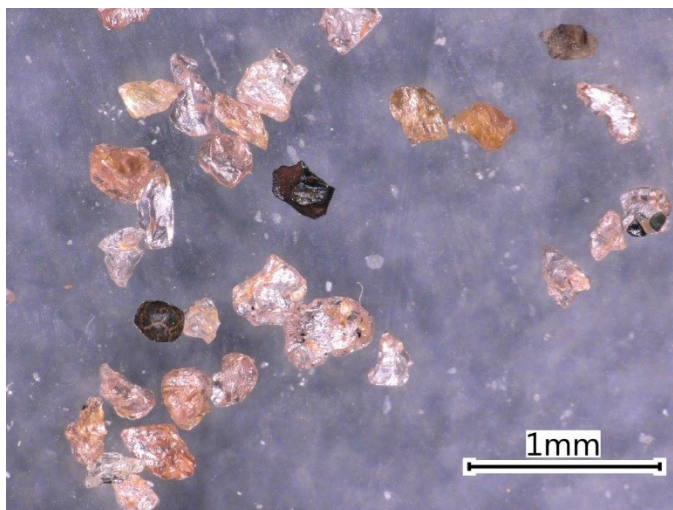
Toto tvrzení jsem znázornil v grafech (graf 10.1 a graf 10.2). Na grafu lze vidět jednoznačně, že se zvyšujícím se tlakem se zvětšuje také hloubka řezu. Pro frézování byly vybrány tlaky 110 MPa a 170 MPa.



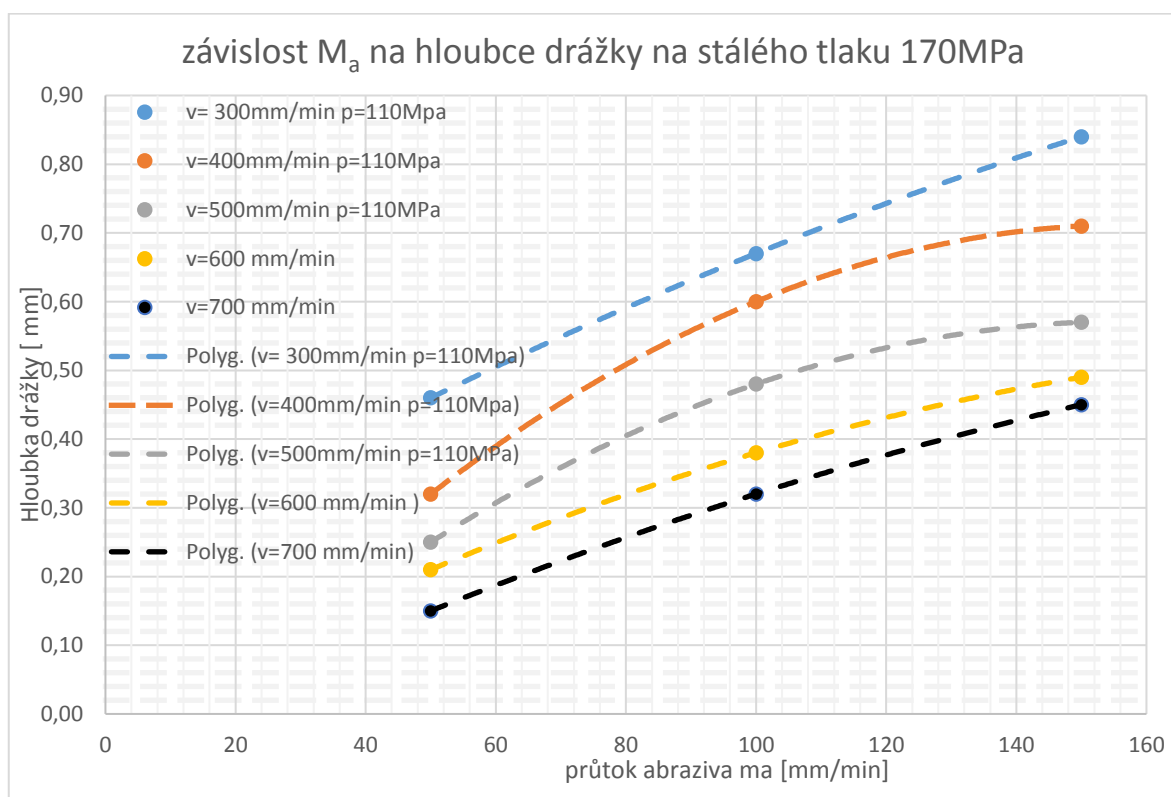
Graf 10.1- Výběr tlaku 110MPa

Průtok Abraziva

Abrazivo je dalším důležitým parametrem v systému obrábění vodním paprskem. Jako abrazivo byl vybrán Indický granát, velikost zrn 80 mesh (obrázek 10.7). Byl zkoumán průtok abraziva 50, 100 a 150 g/min. Se zvyšujícím se průtokem abraziva se zvětšuje i hloubka řezu (graf 10.1 a graf 10.2). Pro další experimenty frézování byl vybrán průtok abraziva $m_a=100\text{g/min}$.



Obrázek 10.7- Indický granát



Graf 10.2-Výběr tlaku 170MPa

Posuvová rychlost

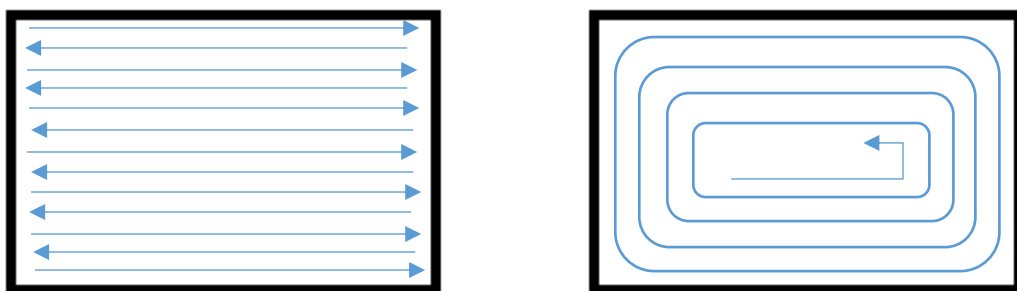
Posuvová rychlost je posledním důležitým parametrem systému vodního paprsku, který nejvíce ovlivňuje úběr materiálu na daném místě. Posuvová rychlost je důležitá pro drsnost povrchu materiálu a nesmí být moc velká, aby se paprsek příliš nezpomalil při změně směru během frézování kapsy. V opačném případě se vytvoří důlky, které hrubě zasáhnou do drsnosti povrchu. Proto byl vybrán parametr, který nám zaručí dostačující drsnost povrchu. Vybraná posuvová rychlost je 400 mm/min. Lze ji odečíst taky v grafech (graf10.1 graf10.2).

10.5. Strategie frézování

Je zřejmé, že zvolená strategie má velký vliv na výsledky obrábění, jakost obrobku a také na ekonomické aspekty výroby. Dále se pak použitím vhodného CAD/CAM systému dosáhne celkového zkrácení času tvorby programů, počínaje vytvořením řezného schématu až po odeslání dat příslušnému obráběcímu stroji.

Současné CAD/CAM systémy nabízejí řadu funkcí a vylepšení, které přispívají ke zvyšování jakosti obrábění. Největšího pokroku je dosaženo v preferovaných oblastech, kam patří zejména výroba forem, zápustek a jiných tvarově složitých součástí v různých odvětvích strojího průmyslu. CAD/CAM systémy zlepšují a zjednodušují práci technologa a zkracují čas tvorby programu i samotné výroby.

Na základě výsledků získaných z vytváření drážek abrazivním vodním paprskem i zkušeností pracovníků pracoviště vodního paprsku na Ústavu geoniky byly pro další experimenty vybrány dvě strategie frézování – lineární frézování s konstantním krokem (obrázek 10.8 vlevo) a lineární spirálové frézování (obrázek 10.8 vpravo) Dráha nástroje je definována podle požadavků a následně zadána řezacímu stroji. [27]



Obrázek 10.8- strategie obrábění

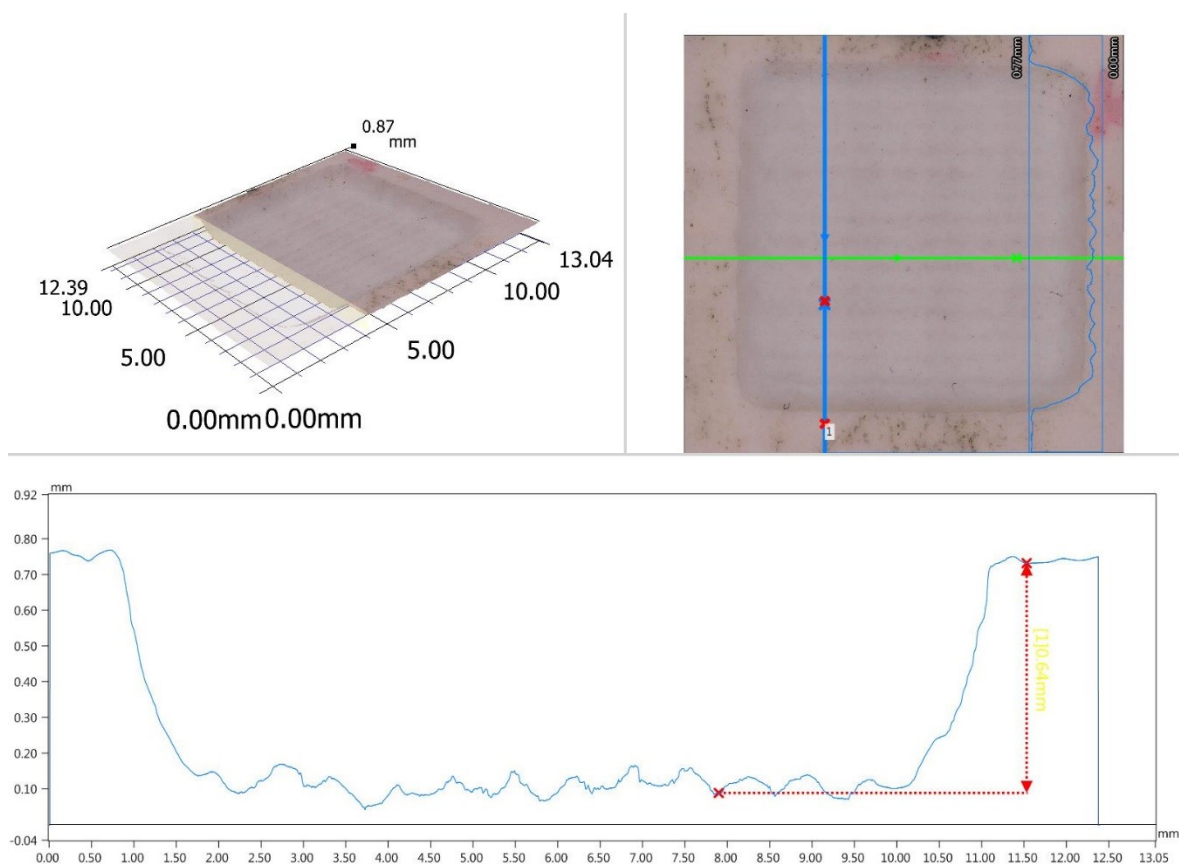
10.6. Strategie lineárního frézování s konstantním krokem

Strategie lineárního frézování s konstantním krokem je nejpoužívanější klasická metoda při frézování vodním paprskem. Tato strategie je nejsnadněji naprogramovatelná, tedy ulehčuje přípravu na obrábění, protože obsahuje velmi málo souřadnic, které se opakují. Nevýhodou je mnoho zbytečných ostrých otáček vodního paprsku, při kterých může docházet ke vzniku důlků na povrchu obrobku.

10.7. Lineárně frézovaná kapsa 2x obrobená při tlaku $p=110$ MPa

Kapsa je obrobená strategií s konstantním krokem, který byl použitý dvakrát k hlubšímu provedení kapsy. Volené řezné parametry tlak $p=110$ MPa, průtok abraziva $m_a=100$ g/min, posuvná rychlost $v_c=400$ mm/min.

Na obrysu kapsy jde zřetelně vidět zešikmení, které způsobil ohyb abrazivního vodního paprsku na okraji (obrázek 10.9) z důvodu velmi tvrdého materiálu. Vlivem pohybu vodního paprsku jsou na nově vytvořeném povrchu patrné stopy způsobující větší drsnost obrobené plochy.

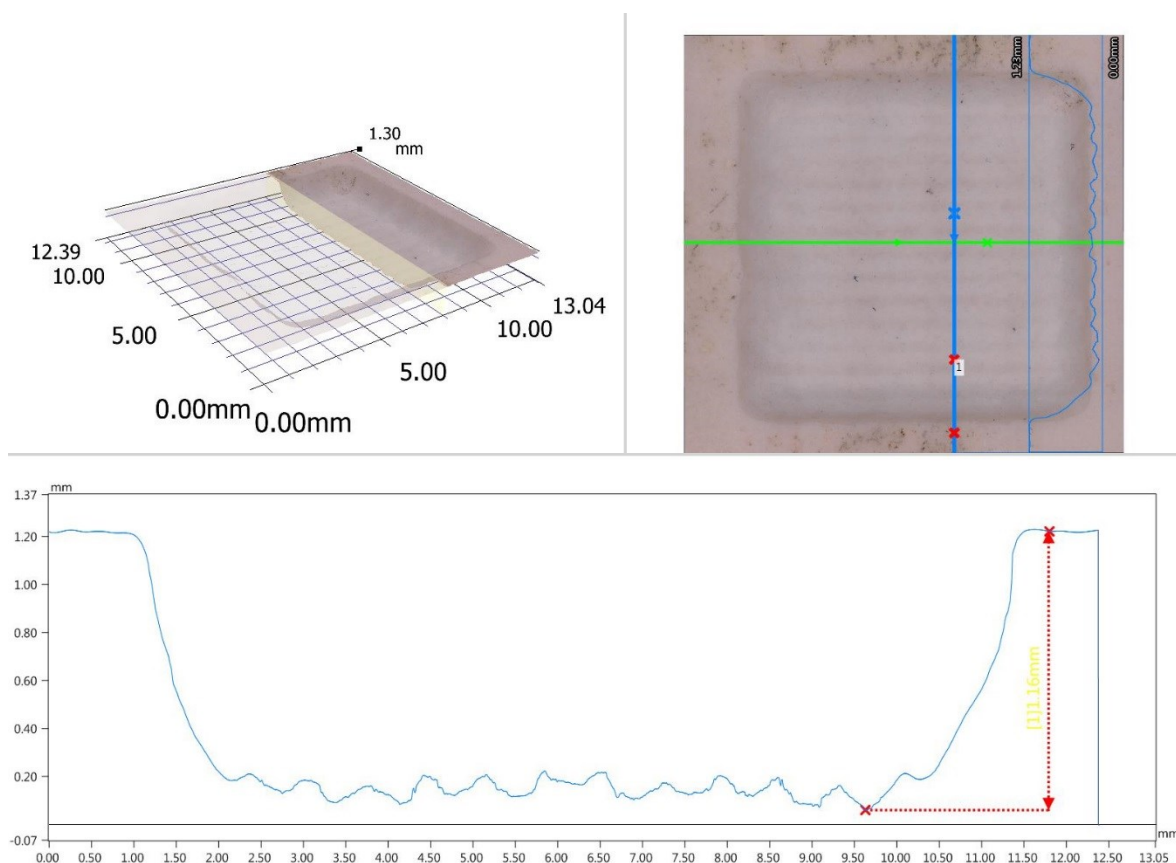


Obrázek 10.9 Lineární kapsa 2P při 110 MPa

10.8. Lineárně frézovaná kapsa 2x obrobená při tlaku $p=170\text{MPa}$

Kapsa je obrobená strategií s konstantním krokem, který byl použitý dvakrát k hlubšímu provedení kapsy. Řezné parametry jsou tlak $p=170\text{MPa}$, průtok abraziva $m_a=100\text{g/min}$, posuvná rychlost $v_c=400\text{ mm/min}$.

Na obrysu kapsy je opět zřetelně vidět zešíkmení způsobené ohybem vodního paprsku na okraji kapsy (obrázek 10.10) z důvodu velké tvrdosti materiálu. Za působení většího tlaku však dochází k menšímu zešíkmení, než bylo u tlaku menšího. Vlivem pohybu vodního paprsku jsou na nově vytvořeném povrchu opět patrné stopy způsobující charakteristickou drsnost obrobené plochy.



Obrázek 10.10 Lineární kapsa 2P při 170MPa

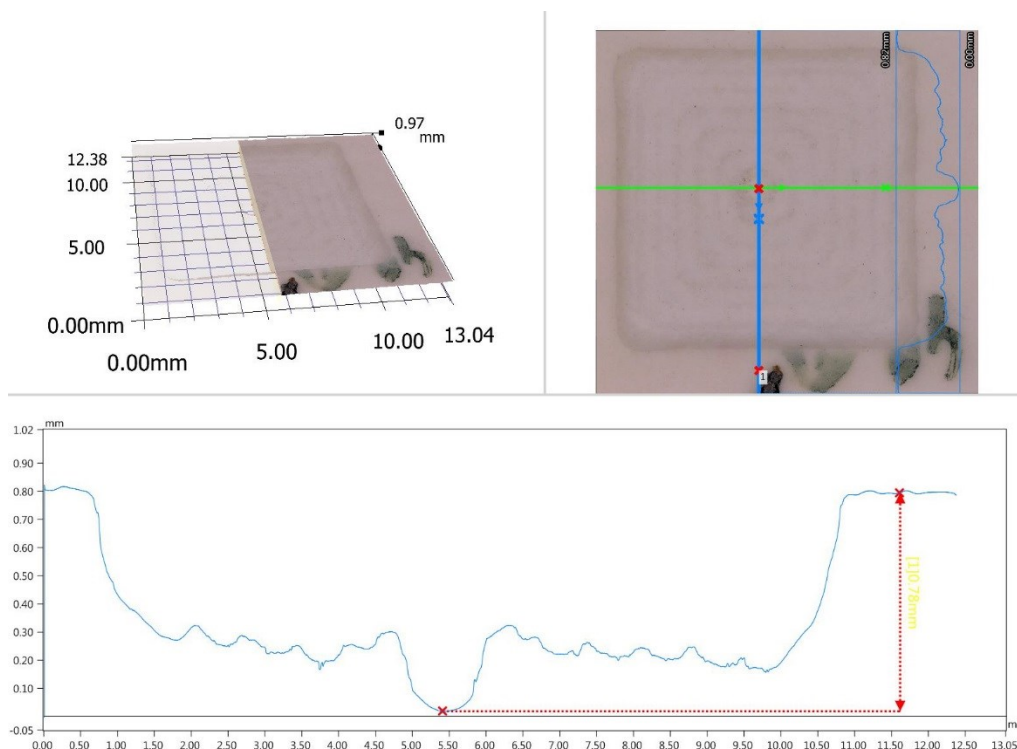
10.9. Lineární spirálová strategie frézování

Spirálová strategie frézování je méně častá metoda při frézování abrazivním vodním paprskem. Tato strategie není snadná na naprogramování, tedy hodně ztěžuje přípravu na obrábění, protože obsahuje velmi mnoho souřadnic, které se neopakují a musejí se dopočítávat. Jistou nevýhodou je, že frézování začíná nebo končí ve středu kapsy, proto se vytváří důlek uprostřed každé kapsy. Hloubka důlku v obrobku závisí na počtu frézovaných cyklů.

10.10. Spirálně frézovaná kapsa 2x obrobená při tlaku $p=110$ MPa

Kapsa je obrobená spirální strategií, která byla použita dvakrát k hlubšímu provedení kapsy. Řezné parametry jsou tlak $p=110$ MPa, průtok abraziva $m_a=100$ g/min, posuvná rychlost $v_c=400$ mm/min.

Na obrysu kapsy jsou zřetelně vidět malá zešíkmení (obrázek 10.11), ale jde o hodně menší zešíkmení, než bylo u strategií s konstantním krokem. Na dně kapsy lze opět pozorovat drážky od frézování abrazivním vodním paprskem, což způsobuje charakteristický vzhled frézované plochy. Evidentní nevýhodou je důlek uprostřed kapsy, který se vytvoří za každých podmínek u spirální strategie.

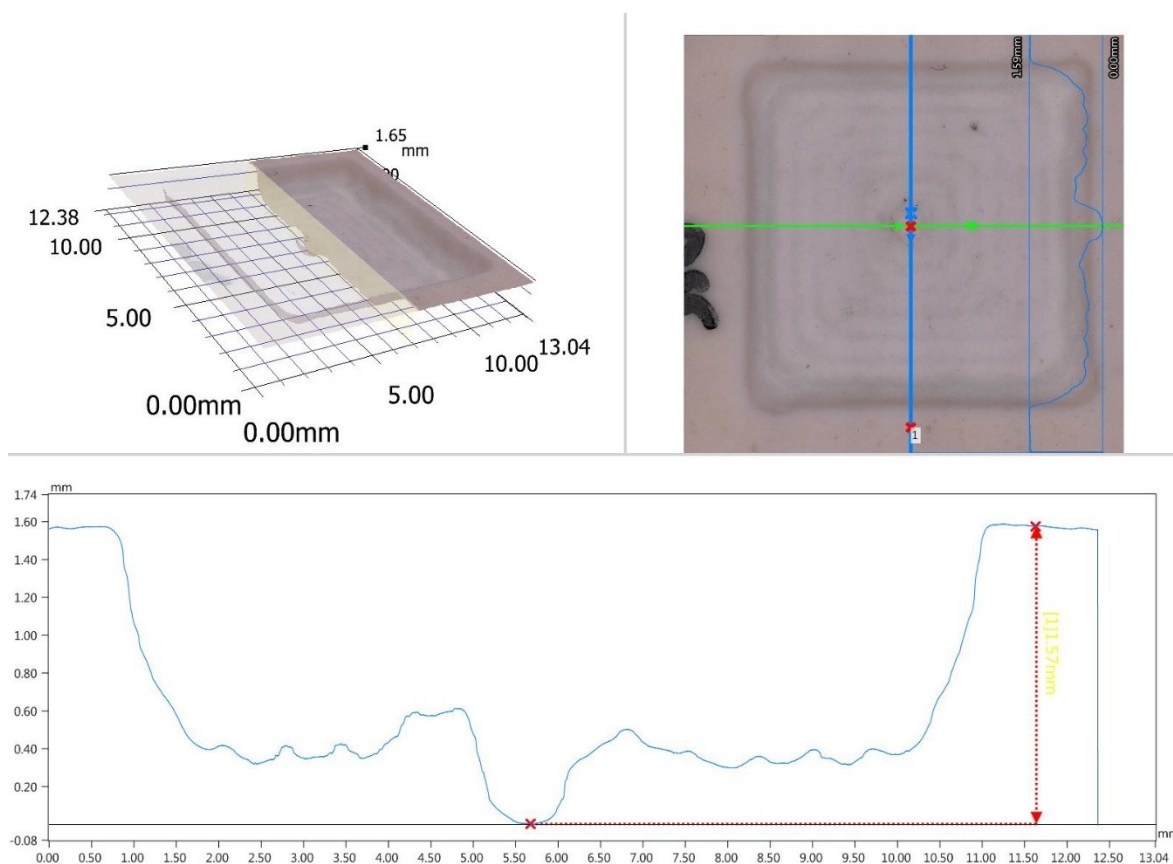


Obrázek 10.11 - spirální kapsa 2P při 110 MPa

10.11. Spirálně frézovaná kapsa 2x obrobená při tlaku $p=170\text{ MPa}$

Kapsa je obrobená spirální strategií, která byla použita dvakrát k hlubšímu provedení kapsy. Řezné parametry jsou tlak $p=170\text{ MPa}$, průtok abraziva $m_a=100\text{ g/min}$, posuvná rychlost $v_c=400\text{ mm/min}$.

Na obrysu kapsy je opět patrné malé zešíkmení způsobené ohybem paprsku na okraji kapsy (obrázek 10.12), ale opět je o hodně menší, než bylo u strategie s konstantním krokem. Na dně kapsy lze opět pozorovat drážky od frézování abrazivním vodním paprskem. Nevýhodou je opět důlek uprostřed kapsy, který se u spirální strategie vytvoří za každých podmínek.



obrázek 10.12- spirální kapsa 2P při 170MPa

11. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem určeným pro frézování tvrdého keramického materiálu a porovnat mezi sebou vzorky vytvořené dvěma typy strategií frézování pomocí paprsku.

Bylo provedeno měření hloubek a rozměrů drážek na zkušebních vzorcích a proměřen výsledný tvar vyfrézovaných kapes. Získané hodnoty a závislosti byly přehledně znázorněny v tabulkách a grafech.

Úvodní kapitola práce je zaměřená na historický vývoj vodních paprsků a jejich postupné začleňování do průmyslu. V následující části je uveden podrobný popis funkce vysokorychlostního vodního paprsku, hlavních částí a nepoužívanějších technologií, které se využívají k rozrušení materiálů erozivní energií vodního paprsku. Konkrétně se jedná o technologie WJ, AWJ, ASJ a tzv. pulzní paprsek, který primárně slouží k zlepšení jakosti povrchu obráběných ploch. V této části je také uveden přehled nejdůležitějších výhod a nevýhod vysokorychlostních vodních paprsků.

V praktické části z jednotlivých experimentálních zkoušek vyplynulo, že pro proces frézování korundové keramiky vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem je účelné volit následující technologické parametry: tlak 170 MPa, průtok abraziva $m_a=100\text{g/min}$ a řeznou rychlost $v=400\text{ mm/min}$. Hodnoty byly zjištěny z rozměrů experimentálních drážek vyrobených řezáním pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku. Následně byly vybrány dvě strategie frézování, ze kterých vyplynulo, že každá strategie má svou výhodu i nedostatek. Pro kladný výsledek je rozhodující zvolit správný postup dle zadaných rozměrových a tvarových požadavků.

Strategie lineárního frézování s konstantním krokem vede k zešíkmení okrajů kapsy, ale ke kvalitnějšímu povrchu dna kapsy. Spirální strategie naopak přispívá k menšímu zešíkmení okrajů kapsy, ale zároveň k tvorbě důlku uprostřed dna kapsy, tedy celkově k méně pravidelnému povrchu dna kapsy.

V celkovém hodnocení z pohledu jakosti povrchu vyplývá, že frézování pomocí vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku vytváří horší povrch a rozměrovou přesnost, než by tomu bylo při frézování konvenční frézku. Podstatnou výhodou je však rychlost frézování a nemožnost otupení nebo zničení řezného nástroje (paprsku) vzájemným kontaktem s obrobkem, jak tomu bývá u třískového obrábění. Zdá se, že abrazivní paprsek je možné využít při počátečních stádiích obrábění k hrubování a dokončovací operace pak provést klasickými způsoby.

Vývoj v této oblasti určitě nekončí a předpokládá se, že tento progresivní způsob obrábění bude dále předmětem experimentů, zkoušek a následných analýz.

12. Použitá literatura

- [1] A History of Leadership. Flow International Corporation. [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>
- [2] History of Waterjet Cutting [oline]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.herbertphillips.co.uk/history-of-waterjet-cutting/>
- [3] SADÍLEK, Marek. Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8.
- [4] Waterjet-cutting-for-engineering. [Http://www.herbertphillips.co.uk](http://www.herbertphillips.co.uk) [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.herbertphillips.co.uk/waterjet-cutting-for-engineering/>
- [5] KRAJNÝ, PHD, Ing. Zdeno. *Vysokotlakový vodný lúč - WJM*. 1. slovensko: STU, 2011. ISBN 978-80-227-3535-3.
- [6] How Waterjet Works. [Https://www.flowwaterjet.com](https://www.flowwaterjet.com) [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.com/Learn/How-Waterjet-Works.aspx>
- [7] Engine moving. [Https://www.flowwaterjet.com](https://www.flowwaterjet.com) [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct_drive_pump
- [8] Hydromotor. [Http://www.parker.cz](http://www.parker.cz) [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.parker.cz/produkty/hydraulika/hydromotory/>
- [9] Principles of abrasive water jet machining. S.l.: Springer, 2012. ISBN 9781447115748.
- [10] Cutting head. [Https://www.flowwaterjet.com](https://www.flowwaterjet.com) [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct_drive_pump
- [11] Řezací hlavy. [Https://www.flowwaterjet.cz](https://www.flowwaterjet.cz) [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Rezaci-hlavy/Standardni>
- [12] dýza. [Https://www.flowwaterjet.com](https://www.flowwaterjet.com) [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct_drive_pump
- [13] Směšovací trubice. [Https://www.flowwaterjet.com](https://www.flowwaterjet.com) [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct_drive_pump
- [14] VALIČEK, Jan a Sergej, HLOCH. Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením. 1. vydání. Ostrava : ÁMOS Mgr. Zdeňka Pustínová, 2008. 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.

- [15] Tribology in Water Jet Processes. SHIMIZU, Seiji. New Tribological Ways [online]. China: Intech, 2011, s. 14 [cit. 2017-11-27]. ISBN 978-953-307-206-7. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/new-tribological-ways/tribology-in-water-jet-processes>
- [16] Čistý vodní paprsek. <https://www.flowwaterjet.com> [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct_drive_pump
- [17] Čistý vodní paprsek. <https://www.flowwaterjet.com> [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct_drive_pump
- [18] Brandt, St.; Louis, H.; Milchers, W.; Mohamed, M.; Pude, F.; von Rad, Ch.: Abrasive Water jets
- [19] Brandt, C.; Louis, H.; Meier, G.; Tebbing, G.: Abrasive Water Suspension Jet – a multifunctional tool for underwater applications. 5th Int. Offshore and Polar Engineering Conference. Int. Soc. of Offshore and Polar Engineers. 1995. pp. 23/29.
- [20] Hashish, M.: Abrasive-fluidjet machinery systems: entrainment versus direct pumping. Proc. 10th International Conference on Jetting Technology. London: Elsevier Science Publishers Ltd 1991. S. 99/113
- [21] Brandt, C.; Louis, H.: Stilllegung und Rückbau: Ermittlung des Anwendungsbereiches von Wasserabrasivsuspensionstrahlen. Endbericht zum BMBF-Vorhaben 02 S 6503 8, 1996.
- [22] SUMMERS, David A. Waterjetting technology. New York: E & FN Spon, 1995. ISBN 9780419196600.
- [23] FOLDYNA, J. Ultrazvuková modulace vysokorychlostních vodních paprsků. Ostrava, 1996. Dizertační práce. Akademie věd České republiky. Ústav geoniky Ostrava.
- [24] PULSATING WATER JET AS A TOOL FOR BASALT SURFACE TREATMENT. SITEK, Libor, Jiri KLICH, Josef FOLDYNA a Jiri SCUCCA. : Pulsating water jets. Krakov, 2011, s. 63-71. ISBN 978-83-930353-4-2.
- [25] VOHLÍDAL, JIŘÍ; ŠTULÍK, KAREL; JULÁK, ALOIS. Chemické a analytické tabulky. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-855-5.
- [26] Otěruvzdorná keramika. <http://www.brisk.cz> [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.brisk.cz/katalogy/technicka-keramika-zapalovaci-elektrody-a-ion-sondy/technicka-keramika/oteruvzdorna-keramika>

- [27] Strategie frézování. <https://www.mmspektrum.com/> [online]. [cit. 2018-05-02].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyspele-strategie-ve-3d-frezovani.html>
- [28] H. Hocheng, H. Y. Tasi, J. J. Shiue and B. Wang, "Feasibility study of Abrasive water jet milling of Fiber Reinforced Plastics" *Journal of manufacturing science and engineering*, 1997, Vol.119, PP 133-142
- [29] D. Arola and M. Ramulu, "Material removal in abrasive waterjet machining of metals Surface integrity and Texture", *Wear*, 1997, Vol.210, PP 50-58
- [30] Jan Valíček, Sergej Hloch and Dražan Kozak, "Surface geometric parameters proposal for the advanced control of abrasive waterjet technology", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, Vol. 41, pp 323-328.
- [31] H.T.Zhu, C.Z.Huang, J.Wang, Q.L.Li and C.L.Che, "Experimental study on abrasive waterjet polishing for hard-brittle materials", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, Vol. 49, pp 569-578.
- [32] Fuat Kartal and Hasan Gokkaya, "Turning with abrasive water jet machining – a review", *International Journal Engineering Science and Technology*, 2013, vol.3, pp 113-122.
- [33] Przemyslaw J. Borkowski, "Application of Abrasive-Water Jet Technology for Material Sculpturing", *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2010, Vol. 34, pp 389-400

13. Seznam obrázků

Obrázek. 2.1 Schematické rozdělení vodních paprsků

Obrázek 4.1-schéma WJ

Obrázek 5.1 – schéma zapojení AWJ

Obrázek 6.1 –suspenní paprsek

Obrázek 6.2-grafy WJS

Obrázek 7.1 Princip generování pulzujícího vodního paprsku.

Obrázek 8.1 – schéma zapojení

Obrázek 8.2 –Řezací hlava pro WJ

Obrázek 8.3- Řezací hlava pro AWJ

Obrázek 9.1 – indický granát

Obrázek 9.2- proudění bez stabilizátoru

obrázek 9.3 proudění s stabilizátorem

Obrázek 10.1 – Experimentální drážky

Obrázek 10.2-drážky 1-5

Obrázek 10.3-drážky 6-10

Obrázek 10.4-drážky 11-15

Obrázek 10.5-drážky 16-20

Obrázek 10.5-drážky 16-20

Obrázek 10.6-drážky 26-30

Obrázek 10.7- Indický granát

Obrázek 10.8- strategie obrábění

Obrázek 10.9 Lineární kapsa 2P při 110MPa

Obrázek 10.10 Lineární kapsa 2P při 170MPa

Obrázek 10.11 - spirální kapsa 2P při 110MPa

Obrázek 10.12- spirální kapsa 2P při 170MPa

13.1. Seznam tabulek

Tabulka 10.1-Parametry drážek

Tabulka 10.2-parametry lineární kapsy

Tabulka 10.3-parametry spirálové kapsy

13.2. Seznam grafů

Graf 10.1- Výběr tlaku 110MPa

Graf 10.2-Výběr tlaku 170MPa